

**Ilaim Costa Junior**

**AgeFor – Proposta de um Modelo de  
Agente Inteligente Baseado na  
Metáfora dos Formigueiros**

Tese apresentada ao Programa de Pós – Graduação em  
Engenharia de Produção da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Como requisito parcial para a obtenção do título de  
Doutor em Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Luiz Fernando Jacintho Maia, Dr.

**Florianópolis  
2002**

C837a

Costa Junior, Ilaim.

AgeFor : proposta de um modelo de agente inteligente baseado na Metáfora dos Formigueiros / Ilaim Costa Junior .  
– 2002.

101 p.

Orientador: Luiz Fernando Jacintho Maia  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2002.

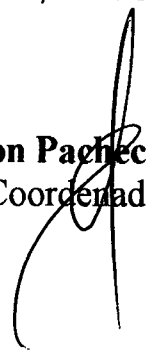
1. Otimização. 2. Agentes Inteligentes. 3. Inteligência Artificial. I. Título.

**Ilaim Costa Junior**

**AgeFor – Uma Proposta de um Modelo de  
Agente Inteligente Baseado na  
Metáfora dos Formigueiros**

Esta Tese foi julgada adequada e aprovada para a obtenção do título  
de Doutor em Engenharia de Produção no Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal  
de Santa Catarina


Florianópolis, 05 de dezembro de 2002.

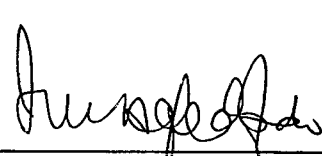
  
**Edson Pacheco Paladini, Dr.**  
Coordenador do Curso

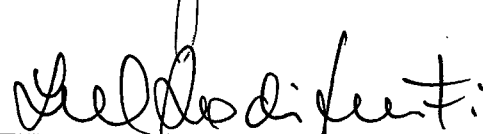
**BANCA EXAMINADORA**

  
**Prof. Luiz Fernando Jacintho Maia, Dr**  
*Orientador*

  
**Prof. João Candido Lima Dovicchi, Dr**

  
**Prof. João Bosco da Mota Alves, Dr**

  
**Luiz Alfredo Soares Garcindo, Dr**

  
**Ilson Wilmar Rodrigues Filho, Dr**

***Dedico esse trabalho à minha Mãe, que mesmo longe esteve perto  
nas horas necessárias dando-me apoio.***

## **Agradecimentos**

*A Deus. Não pela vida, que é apenas mais uma, mas por existir e ter podido realizar esse trabalho.*

*Ao meu Orientador, Professor Luiz F. J. Maia, pela competente orientação, que já remonta longa data e pela amizade.*

*Aos professores do programa, em especial o Professor João Bosco da Mota Alves, pela amizade.*

***Aos meus muitos amigos que moram no meu coração e que de alguma forma contribuíram para a realização deste. Nomeá-los seria mais que justo, porém corro o risco de esquecer de algum, por serem muitos e eu imperfeito, o que seria injusto.***

*Àqueles muitos a quem devo meus agradecimentos, pois apesar de não serem amigos, de alguma forma me ajudaram. São tantos, que com certeza a maioria ficará de fora. Por isso me absterei de tentar listá-los.*

## **Resumo**

**COSTA JR. Ilaim. AgeFor – Proposta de um Modelo de Agente Inteligente Baseado na Metáfora dos Formigueiros. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.**

Cada vez mais os processos de desenvolvimento de software têm se complicado em virtude do fato da complexidade dos problemas a serem resolvidos estarem aumentando de forma bastante razoável. Para tanto, aqui está se propondo um modelo para construção de software inteligente – AgeFor – que, a partir da metáfora de como se organiza, se comporta e vive uma colônia de formigas; tenta-se criar o comportamento colaborativo, cooperativo e inteligente de agentes de software.

**Palavras – chave: Otimização, Agentes Inteligentes, Inteligência Artificial**

## **Abstract**

**COSTA JR. Ilaim. AgeFor – Proposta de um Modelo de Agente Inteligente Baseado na Metáfora dos Formigueiros. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.**

In the last few years software development has been very hard due the increased complexity of the problems to solve. A problem that matches that kind of problems is the optimization and constraint satisfaction problems. To contribute to the process of a develop a solution, this document presents a Software Agent Model – AgeFor. It is construct under the Ant Colony metaphor and, consequently, the comportment is collaborative, cooperative and intelligent.

**Key-words: Optimization, Artificial Intelligence, Agents.**

## SUMÁRIO

<b>Lista de Equações .....</b>	<b>7</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>8</b>
<b>Lista de Gráficos.....</b>	<b>9</b>
<b>Introdução.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Agentes Inteligentes.....</b>	<b>13</b>
1.1 Introdução .....	13
1.2 Cenários de Aplicação – Tipos de Agentes .....	18
1.2.1 Agentes de Informação .....	18
1.2.2 Agentes Cooperativos.....	19
1.2.3 Agentes de Transação .....	19
1.3 Propriedades dos Agentes.....	20
1.3 Arquiteturas de Agentes.....	22
<b>2. Algoritmos Inspirados na Natureza.....</b>	<b>26</b>
2.1 Introdução .....	26
2.2 Computação Evolutiva .....	28
2.2.1 Algoritmos Genéticos .....	29
2.3 Sistema de Formigas .....	39
<b>3. Otimização da Distribuição .....</b>	<b>44</b>
3.1 Introdução .....	44
3.2 Problema do Empacotamento Tridimensional .....	44
3.3 Problema de Roteamento .....	48
<b>4. Agente Formigueiro – AgeFor .....</b>	<b>53</b>
4.1 Introdução .....	53
4.2 A Sociedade das Formigas .....	56
4.3 A Procura por Alimento .....	58
4.4 Colônias Novas e Colônias mais Velhas .....	60
4.5 Formigueiros Nebulosos .....	60



4.6 Ação sem Comando .....	62
4.7 A Gestão do Formigueiro .....	62
4.8 Formigueiro como um Sistema Complexo .....	63
4.9 O Formigueiro Complexo e Inteligente .....	65
4.10 AgeFor – Agente Formigueiro .....	81
4.10.1 Percepção .....	83
4.10.2 Comunicação .....	84
4.10.3 Atuação – Ação .....	84
4.10.4 Desempenho .....	85
4.10.5 Autonomia .....	85
4.10.6 Conhecimento sobre o Ambiente .....	86
4.11 Processamento Paralelo .....	90
4.12 Processamento Distribuído .....	90
4.13 Comportamento Colaborativo .....	91
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>92</b>
<b>6. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>94</b>

## **Lista de equações**

Equação 1: Regra Proporcional Randômica.....	p. 39
Equação 2: Regra de Atualização Global.....	p. 40

## **Lista de figuras**

Figura 1.1: Esquema Arquitetônico Geral .....	p. 20
Figura 2.1: Operador de Cruzamento baseado em um ponto.....	p. 33
Figura 2.2: Operador de Mutação.....	p. 34
Figura 2.3: Formigas e seus caminhos.....	p. 38
Figura 3.1: Operação formiga e paletização.....	p. 44
Figura 4.1: AgeFor.....	p. 81
Figura 4.2: Agente AgeFor.....	p. 86

## **Lista de gráficos**

**Gráfico 2.1: Comportamento da função.....p. 31**

## Introdução

Os Agentes Inteligentes (AI), têm recebido grande atenção nos últimos anos, o que pode ser visto pelo crescente interesse da indústria em adotá-los no desenvolvimento de seus projetos e produtos. Juntamente com isso observa-se um crescimento de teorias, arquiteturas e linguagens específicas para Agentes.

Pode-se dizer que a origem dos Agentes encontra-se em diversas áreas, uma vez que os pesquisadores são oriundos dos mais diversos campos, destacando-se a Inteligência Artificial Distribuída (IAD) e a Computação Distribuída.

Vê-se em [GAS91], [BRO86] e [DUR94]; que em meados da década de 70, pesquisadores de IAD esperavam formular teorias, arquiteturas e experimentos básicos que mostrassem (computacionalmente falando) como a interação e divisão de trabalho poderiam ser realmente aplicadas à resolução de problemas. Experimentos mostraram que o comportamento inteligente e racional não era exclusivo de elementos isolados, mas também o resultado que nasce da interação de entidades com comportamento simples.

Atualmente vê-se AI aplicado à solução dos mais diversos problemas. Como exemplo destaca-se: AI em sistemas de potência [GUS99].Aplicação desenvolvida pela empresa estatal de energia elétrica da Suécia com o objetivo de aproveitar a rede de distribuição de energia para o tráfego de informações. AI são utilizados na comunicação com empresas, indústrias, residências, escritórios com o objetivo de promover a diminuição do consumo energético, bem como satisfazer melhor as necessidades dos usuários, promovendo o uso ideal a cada indivíduo ou entidade. Para tanto foram desenvolvidos artefatos eletrônicos especiais que estabeleceram a comunicação entre os Agentes que trafegavam na rede de energia elétrica e os aparelhos elétricos e eletrônicos em uso nos locais de consumo de energia. A partir daí era realizada uma análise de consumo, no sentido de se obter o ponto ideal, ou seja, que atendesse ao usuário e às metas de economia da companhia de energia.

Outra interessante aplicação e que pode ser vista em [DRA99] é do âmbito da computação científica. Consiste da simulação do funcionamento de uma turbina movida a gás. Dispositivo complexo e de grande importância econômica. Em virtude da dificuldade de solucionar tal problema, o mesmo foi particionado em vários

subproblemas. Com isso, uma rede de Agentes colaborativos, onde cada um preocupa-se com cada subproblema foi obtida. Diferentes tipos de Agentes (solucionadores, mediadores, buscadores, entre outros) permitiram o manuseio de modelos matemáticos complexos de forma natural e direta. Uma das atividades dos Agentes era percorrer a Internet na busca de programas de computadores que fossem capazes de solucionar muitos dos problemas de cálculo numérico encontrados na modelagem do sistema, outros atuavam como mediadores entre o problema e programa-solução encontrado, no sentido de passar parâmetros e obter resultados. Outros ainda trabalhavam na consolidação e organização de todas as soluções de todos os subproblemas oriundos do problema maior; o que, no final, possibilitou a solução do problema como um todo. Nessa aplicação destaca-se a originalidade da aplicação de Agentes para buscar códigos, programas prontos, para solucionar eventuais subproblemas. A idéia nasceu a partir de dois pontos. Primeiro é conhecido de todos a enorme riqueza de informações existente na Internet, dentre as quais programas de computadores e seus respectivos códigos fonte. Segundo a complexidade e morosidade inerentes ao desenvolvimento de programas para tratar problemas e modelos complexos de matemática computacional. Daí ter-se construído Agentes que pudessem executar de forma rápida e eficiente tal tarefa, culminando com o sucesso.

Como essas e muitas outras, ricas, bem sucedidas e complexas aplicações poderiam ser citadas, confirmando cada vez mais a viabilidade dos AI.

## ***Objetivos***

### ***Objetivo Geral***

O presente trabalho, tem por objetivo propor um Modelo de Agente Inteligente Colaborativo que possa ser aplicado no tratamento de problemas computacionais difíceis.

## **Objetivos Específicos**

- Proposta de um Modelo de Agente Inteligente baseado na metáfora do formigueiro;
- Mostrar como a inteligência coletiva pode ser usada para a modelagem de Agentes Colaborativos;

Para que os objetivos possam ser atingidos, o trabalho deverá contar com um primeiro capítulo que terá por fim dar uma descrição do que vem a ser um Agente Inteligente.

O segundo capítulo trata de técnicas modernas de Inteligência Computacional, especificamente algoritmos genéticos e colônias de formigas enfocando de forma sucinta os conceitos que serão utilizados para o desenvolvimento do modelo que se está propondo.

O terceiro capítulo trata de problemas combinatórios, especificamente, problema do corte tridimensional ou empacotamento, problema de alocação e distribuição de recursos, problema de roteamento de veículos. Formas tradicionais de abordagens.

O quarto capítulo mostra o Modelo do Agente Inteligente proposto por esse trabalho.

O quinto capítulo consiste de conclusão e apreciações finais.

## **1. Agentes Inteligentes**

### **1.1 Introdução**

Segundo [KAY84], a idéia de Agentes originou-se com John McCarthy em 1950, e o termo foi cunhado por Oliver G. Selfridge alguns anos mais tarde, quando ambos estavam no MIT. Eles tinham em mente um sistema que, quando dada uma meta, o mesmo procurava pelos recursos computacionais adequados para atingi-la, fazia perguntas e recebia “conselhos”, oferecido em termos humanos quando solicitado. Um agente é um robô que reside, realiza negócios, tarefas, num mundo computacional.

Segundo [NWA96] a pesquisa em Agentes pode ser dividida em duas épocas. A primeira, tendo início em 1977, tem raízes na Inteligência Artificial Distribuída (IAD); onde os Agentes deliberativos com modelos internos simbólicos são sua principal preocupação. Estão presentes também aspectos como a interação e comunicação entre Agentes, a decomposição e distribuição de tarefas, coordenação e cooperação, resolução de conflito via navegação, entre outros. A segunda época iniciou-se por volta de 1990 apresentando um recente e rápido movimento de crescimento para estudar os vários tipos e aspectos dos Agentes, dos mais morosos aos mais rápidos e com bom desempenho. A ênfase foi substituída para o fazer, para a ação remota. A grande variedade de aplicações e abordagens é o motivo pelo qual os Agentes têm feito tanto sucesso.

Uma vez que Agentes dos mais variados tipos e com as mais diversas finalidades têm aparecido, há uma utilização indiscriminada do termo sem a menor coerência em termos de consenso ou significado. Apresenta-se abaixo uma série de situações em que programas são denominados Agentes, segundo [BRE98]:

- Desempenhar um escalonamento avançado de tarefas numa máquina remota;
- Executar tarefas de baixo nível enquanto as instruções para tanto são dadas em uma linguagem de programação de alto nível ou script;



- Abstrair ou encapsular os detalhes das diferenças entre fontes de informação ou serviços de processamento;
- Manifestar características de inteligência distribuída;
- Exercer mediação entre pessoas e programas;
- Desempenhar tarefas de assistência inteligente;
- Migrar através de um caminho auto-direcionado de um computador para outro computador;
- Apresentarem-se a usuários com características bastante convincentes;
- Manifestar intenções e outros aspectos de "estado mental".

Em virtude da natureza do trabalho nenhuma das situações acima enquadra-se nesse contexto. Em vista disso será apresentada uma definição que se aproxima um pouco mais de sua realidade, ainda que a mesma não seja a oficialmente adotada. A definição de que se segue foi dada por [SHO97].

*É uma entidade de software que funciona continuamente e autonomamente em um ambiente particular, freqüentemente habitado por outros Agentes e processos. A exigência para a autonomia e continuidade é devido ao fato de se desejar que o agente seja capaz de realizar suas atividades de maneira flexível e inteligente, o que é responsável por mudanças no ambiente sem uma pré-interferência humana. O ideal é que um agente que atue continuamente em um ambiente por um longo período de tempo seja capaz de aprender com essa experiência. Além disso, espera-se que tal agente, que convive em um ambiente juntamente com outros Agentes e processos, seja capaz de se comunicar e cooperar com eles, até mesmo mover-se de um lugar para outro.*

Segundo [NOR95], Um agente é uma entidade que pode perceber seu ambiente através de sensores (ou sistemas de percepção) e atuar sobre ele por intermédio de

seus mecanismos de atuação (ou sistemas de atuação, atuadores). Para isso dispõe de uma representação parcial desse ambiente, podendo, em um universo multiagente (vários Agentes em comunidade), comunicar-se com outros Agentes. O comportamento global do agente ou da comunidade de Agentes é consequência de suas percepções e conhecimentos, bem como das interações realizadas.

Um agente humano tem olhos, ouvidos e outros órgãos como sensores; e mãos, pés como sistemas de atuação, [NOR95].

Um agente robô (ou software) possui câmeras e sensores infravermelhos para realizar a percepção e motores (ou mecanismos de comunicação) para exercer a atuação, [NOR95].

O agente, ao atuar em seu meio deve realizar a tarefa que lhe compete de forma correta, onde por correto entende-se a atitude ou decisão que leve ao maior índice de sucesso possível. No entanto pode-se perguntar. O que é o sucesso? Ou ainda, como medir o sucesso? Quando medir o sucesso?

Para que as respostas a tais questionamentos sejam dadas de forma satisfatória, faz-se necessária a existência de um mecanismo com o qual pode-se realizar uma mensuração de toda a atividade do Agente.

Pode ser chamada de **medida de desempenho** o critério para se determinar o sucesso do Agente, ou seja, realiza a mensuração das atividades do Agente.

Em virtude das diferenças existentes entre as aplicações e os Agentes, não há um critério único, padrão, para medir o desempenho, e conseqüentemente determinar o sucesso que o Agente alcançou. Assim, de acordo com o ambiente, deverá ser estabelecida uma **medida de desempenho** que mostre o que significa sucesso naquela aplicação.

Como exemplo pode-se imaginar um Agente carteiro. Seu principal objetivo é deixar a agência dos correios e entregar as cartas, encomendas, daquele dia.

Uma **medida de desempenho** para o Agente carteiro seria a quantidade de cartas e encomendas que ele consegue entregar num período de tempo de 8 (oito) horas. Uma outra **medida de desempenho** (mais sofisticada) pode levar em consideração não só o fator tempo e quantidade de entregas, mas também o volume de energia gasto para a realização da tarefa, ou seja, o quão cansado encontra-se o Agente após a realização de seu trabalho, uma vez que, o mesmo sendo humano

necessita de boas condições de trabalho. Uma outra, e ainda mais sofisticada **medida de desempenho** levaria em consideração a maximização da quantidade de entregas realizadas (cartas e encomendas) e a minimização do tempo e do volume de energia para o alcance do objetivo, atendendo ainda a restrições de satisfação do cliente destinatário.

Tudo o que foi exposto acima pode ser visto em [NOR95]. Foi extraído e reescrito conforme as necessidades aqui presentes. Pode-se observar, dessa forma, todas as nuances que envolvem definir e medir o desempenho de um Agente e o quanto isso é bem particular em relação à aplicação, ou seja, cada caso é um caso.

Um outro aspecto que envolve a definição de Agentes vem a ser a **"onisciência"**, sendo levantado em [NOR95].

Pensando-se ainda no Agente carteiro que anda por aí a entregar cartas e encomendas. Imagine uma situação onde o Agente deve necessariamente passar sob um viaduto para entrega determinada carta. Nesse instante um acidente ocorre encima do viaduto, e um dos carros envolvidos no acidente desgoverna-se a ponto de romper a barra de proteção natural e cair do viaduto. Essa queda dá-se justamente sobre o Agente (carteiro) e o mata. Note que enquanto não havia acidente e conseqüentemente queda de carro o Agente estava fazendo tudo certo, e tudo acabaria bem, se não fosse o carro cair em sua cabeça. É claro que não é possível prever esse tipo de coisa, no entanto, se o Agente estivesse equipado com um sistema de radar, o acidente teria ocorrido de qualquer forma sobre o viaduto, mas ele teria detectado que um carro iria cair em sua cabeça e poderia assim evitar sua morte.

O objetivo não é a criação de Agentes perfeitos, mas a enumeração de condições para que eles consigam realizar suas tarefas de forma satisfatória. Para isso é necessário que perceber o seu ambiente da forma mais clara e exata possível. É claro que especificar um agente que **sempre faz o que atualmente** é o correto é, no mínimo, impossível, a menos que o mesmo possua algum objeto de adivinhação, [NOR95].

Apesar do exposto, a intenção é que o Agente seja o mais racional possível. Para isso o mesmo vai depender de [NOR95]:

**Medida de Desempenho:** que define o grau de sucesso;

**Seqüência de Percepção:** histórico de percepções do Agente, tudo que ele tenha percebido a partir de suas interações no ambiente em que se encontra; O conhecimento do Agente a respeito do ambiente, ou sua base de conhecimento;

As ações que o Agente pode desempenhar.

De modo geral o ideal é que, para cada seqüência possível de percepções, o Agente, independente da ação realizada, maximize sua **medida de desempenho** no ambiente em que esteja atuando.

Um outro aspecto que deve ser levado em consideração para obtenção do resultado acima é a **autonomia**. Pode-se dizer que um sistema é autônomo se seu comportamento é determinado pela sua própria experiência [NOR95].

Na natureza observa-se que quando nascem, os animais já possuem um pouco de experiência (instinto, conhecimento), que lhes proporciona viver tempo "suficiente" até aprender mais por si mesmo e conseguir lutar de maneira mais efetiva por sua sobrevivência, no que diz respeito à busca de alimento, proteger-se de predadores, livrar-se de acidentes e encontrar um parceiro para que possa dar continuidade a sua espécie.

Falando de Agentes, é razoável provê-lo com conhecimento inicial que o habilite a continuar aprendendo, aperfeiçoando sua maneira de agir, dando mais consistência a suas ações, em fim refinando cada vez mais o seu desempenho, dando-lhe maiores condições de autonomia.

Em virtude de tudo o que foi exposto acima, pode-se dizer que **somente a inteligência permite a um Agente realizar suas tarefas de forma satisfatória e autônoma**, necessitando a intervenção do usuário somente em casos excepcionais, isto é, apenas em situações de importantes decisões.

Nesse trabalho será considerado que um Agente sempre requer uma certa quantidade de inteligência para o desempenho de suas tarefas. Dessa forma, um Agente não inteligente será considerado um software tradicional, uma vez que os mesmos apenas realizam tarefas específicas e proporcionam a seus usuários pequena economia de tempo em virtude das freqüentes e necessárias intervenções dos mesmos.

Resumindo, é essencial nesse trabalho, que para ser considerado Agente, o software seja capaz de realizar processamento autônomo. Caso não seja é um software comum ou tradicional.

Como já foi dito, um Agente deve interagir com o seu ambiente para realizar as tarefas a que se propõem. Ele deve ser capaz de obter informações a partir de seus sensores e usá-las para tomar decisões, bem como iniciar outras ações específicas baseadas nessas decisões e assim sucessivamente. Isso é o que faz um “Agente Humano”. No entanto, por mais que isso seja interessante e necessário para o bom desempenho de suas tarefas não é suficiente, uma vez que “Agentes Humanos”, além disso, também são capazes de se comunicar e cooperar diretamente com outros objetos e Agentes. Dessa forma vê-se que os Agentes Inteligentes também devem possuir tais capacidades. Eles precisam estar munidos de algum mecanismo de comunicação e cooperação.

A partir das características discutidas até agora é possível visualizar alguns distintos cenários de aplicações de Agentes. Sem perda de generalidade serão discutidos e analisados apenas três destes cenários, conforme pode ser visto em [BRE98].

## **1.2 Cenários de Aplicação – Tipos de Agentes**

### **1.2.1 Agentes de Informação**

A principal tarefa desse tipo de Agente é habilitar seus usuários a realizar buscas por informações em um sistema distribuído ou em redes de computadores. O Agente de Informação deve ser capaz de localizar repositórios de informações, extrair informações desses repositórios, filtrar as informações que são relevantes para os usuários, apresentá-las de forma apropriada. Note que se alguns desses passos estiverem ausentes da tarefa realizada pelo Agente, o mesmo não poderá se considerado totalmente útil.

### **1.2.2 Agentes Cooperativos**

Esses Agentes têm um foco diferente do anterior. Sua principal tarefa é solucionar problemas complexos através do uso da comunicação e de mecanismos de cooperação com outros objetos, tais como, humanos, outros Agentes ou recursos externos. Os Agentes Cooperativos são usados quando um problema excede a capacidade de um Agente individual ou quando já existem Agentes que conhecem a solução e o conhecimento pode ser usado por outros Agentes.

A inteligência requerida por Agentes Cooperativos é bem maior do que a utilizada pelos Agentes de Informação, uma vez que o desenvolvimento de estratégias de solução de problemas e a cooperação entre diversos Agentes são tarefas significativamente mais complexas e menos passíveis de previsão do que a busca por informação.

### **1.2.3 Agentes de Transação**

Agentes de Transação formam a terceira grande área de aplicação de AIs.

Tanto em clássicos ambientes de bancos de dados quanto em gerenciamento de redes e comércio eletrônico, a principal tarefa dos AIs é o processamento e o monitoramento das transações. Agentes de Transação encaixam-se perfeitamente em tais tarefas. Segurança, robustez, proteção de dados, são aspectos centrais no desenvolvimento dos Agentes de Transação. Tais Agentes operam em áreas sensíveis e representam seus usuários para tarefas com alto grau de responsabilidade, um exemplo seria a compra de produtos usando cartões de crédito. Em casos como esses, o comportamento incorreto como a quebra do sigilo, podem resultar em graves consequências, o que é inaceitável para os Agentes de Transação.

As três categorias de AIs descritas acima não são mutuamente excludentes. Apesar das diferenças entre elas é possível um mesmo Agente estar presente em duas ou até mesmo nas três.

Neste trabalho os Agentes foram divididos em três categorias de aplicação. No entanto outras forma e quantidades de divisões existem e podem ser vistas na literatura [NWA96].

Apesar de já terem sido mostradas algumas das características essenciais para os AI, abaixo será mostrada uma generalização das mesmas. De modo geral os Agentes podem ser agrupados em duas grandes categorias; em relação a características internas e externas.

As propriedades ou características internas dos Agentes são aquelas que formam o estado interno dos Agentes, ou seja, o aprendizado, a reatividade, autonomia e a orientação a metas. Por sua vez, as propriedades externas compreendem aquelas que afetam a interação dos diversos Agentes (cooperação), ou a comunicação dos Agentes e das pessoas (comunicação). De modo mais detalhados essas características são:

### 1.3 Propriedades dos Agentes

Segundo [NWA96] tem-se as seguintes propriedades dos agentes.

**Reatividade:** é a habilidade que o Agente possui de reagir apropriadamente a influências ou informações de seu ambiente. Esse ambiente pode ser composto de outros Agentes, usuários, fontes externas de informações ou objetos físicos. A reatividade está entre as características essenciais de um AI. Como já foi dito anteriormente, o Agente deve possuir sensores e um modelo interno do ambiente que o permita reagir a mudanças no mesmo. Se ele só possui sensores é considerado um Agente reativo simples, mas, se, além disso, tem um modelo interno do ambiente é denominado deliberativo.

**Pró-Atividade:** Esta propriedade é mais sofisticada que a anterior, uma vez que um Agente não apenas reage a mudanças ambientais, mas toma iniciativas sobre circunstâncias específicas. Para que esta habilidade seja

alcançada faz-se necessário que o Agente possua metas bem definidas, em outras palavras, que ele seja Orientado a Metas.

**Raciocínio/Aprendizado:** Como já visto anteriormente, todo Agente deve possuir um mínimo de inteligência para ser considerado como tal. Sua inteligência é formada principalmente por três fatores que são: base de conhecimento, capacidade de raciocínio baseada no conteúdo da base de conhecimento, habilidade de aprender e/ou adaptar-se a mudanças do ambiente, ou seja, comportamento adaptativo. Deve-se notar, entretanto, que a presença dos três fatores simultaneamente não é essencial.

**Autonomia:** Além da inteligência, a autonomia é outra importante característica, que faz do Agente, um software diferente dos softwares tradicionais. Esta propriedade o permite encontrar sua meta autonomamente, ou seja, sem interações ou comandos do ambiente. Em outras palavras, ele não precisa da aprovação de usuários ou outros Agentes para agir ou tomar decisões, ele é capaz de agir sozinho.

**Mobilidade:** É a habilidade do Agente de navegar em uma rede de computadores, podendo ir de um computador para outro. A mobilidade envolve várias questões que ainda deixam a desejar como segurança, privacidade de dados, gerenciamento, entre outras. Segundo alguns autores [BRE98], somente a mobilidade mostra o verdadeiro poder dos AI. No entanto [MAE97] argumenta que não há nada que se faça com um Agente móvel que não se possa fazer com um Agente estacionário.

**Comunicação:** Uma vez que um Agente geralmente requer interação com o ambiente no qual está inserido (usuários humanos, outros Agentes, etc), ele deve fazer uso da comunicação para estabelecer tal intento. Uma linguagem de comunicação para Agentes permite que eles se comuniquem. De modo geral, a comunicação é adequada apenas para sistemas compostos de Agentes simples (Agentes com o atributo



inteligência reduzido) e para a comunicação entre Agentes e recursos externos.

**Cooperação:** É a habilidade que vários Agentes possuem de instituir um diálogo com o intuito de atingir determinada meta. A cooperação entre diversos Agentes permite uma rápida e melhor solução para tarefas complexas que excedem a capacidade de um único Agente. Os Agentes que cooperam entre si são de modo geral complexos, ou seja, o seu atributo inteligência é altamente elaborado.

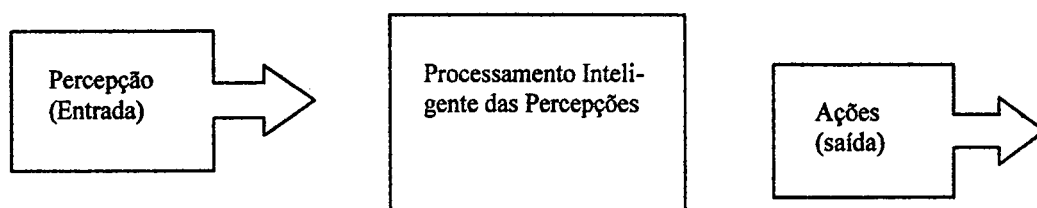
**Personalidade:** Os seres humanos têm certas características que compõem o que se chama personalidade. No que diz respeito aos Agentes, algumas vezes é desejável que eles demonstrem possuí-la. É o caso de quando o mesmo se apresenta aos usuários como uma pessoa virtual; ele deve possuir determinadas características para satisfazer seu interlocutor. Um outro importante atributo da personalidade é a honestidade. Nenhum usuário utiliza um Agente para tarefas importantes se o mesmo não a possuir.

## 1.4 Arquiteturas de Agentes

Pretende-se agora, mostrar de forma mais específica, aspectos que dizem respeito à arquitetura do Agente.

De modo geral, o que se chama arquitetura do Agente são as especificações das interações que o mesmo realiza com o mundo, bem como quais e como são os processos internos que possibilitam a realização destas interações.

O esquema arquitetônico que se segue está baseado em [BRE98] e [MUL96]. Nele pode-se observar um módulo responsável pela entrada (percepção), processamento inteligente e posteriormente a saída (ações).



**Figura 1.1: Esquema Arquitetônico Geral**

Na fig.1.1, quando se fala em percepção (entrada) refere-se a toda e qualquer informação que o Agente obtém do ambiente em que está inserido e que, de modo direto ou indireto, o provê de subsídios que o permite atuar de modo a atingir sua meta. É fácil notar que tais percepções podem ser refinadas ao extremo e adaptadas ao agente que se deseja ou necessita possuir.

Já o módulo central da figura acima mostra o processamento da informação obtida na etapa anterior. É claro que em se tratando de Agentes Inteligentes, esse processamento necessariamente deve ser inteligente, o que sugere, antecipadamente uma série de refinamentos, baseados nos mais diversos tipos de percepções possíveis de serem adquiridas. Como exemplo, pode-se pensar em um refinamento composto de gerenciamento de base de conhecimento, aprendizagem, processamento de imagem, inferência, etc... O que certamente deve ser adaptado ao contexto em que se encontra. Apesar da generalidade do módulo da figura, é possível se ter uma idéia bastante consistente de como o Agente deve trabalhar seu conjunto de percepções para que sua meta seja atingida.

O último módulo trata da saída, ou mais propriamente falando, ações a serem executadas pelo Agente. É claro que vão estar intimamente ligadas ao processamento das informações, uma vez que, em se tratado de AIs, os mesmos podem ter um comportamento pró-ativo. Dessa forma, ações devem ser vistas como atitudes que devem ser tomadas para a manutenção ou alcance das metas, e isso, conforme já foi mencionado nos casos anteriores, está intimamente ligado a cada situação, merecendo, especificações mais detalhadas de acordo com o contexto.

Vale ainda ressaltar que o esquema acima é por demais abstrato, carecendo de maiores refinamentos, mesmo sem especificações detalhadas do ambiente em que

o Agente deve atuar. Para tanto, abaixo serão mostradas classes mais abrangentes de arquiteturas presentes na literatura.

- **Arquiteturas Reativas ou Não-Deliberativas:** São aqueles para as quais a escolha da ação está diretamente situada na ocorrência de um conjunto de eventos que ocorrem no ambiente, por exemplo, através de algum procedimento pré-compilado ou embutido em algum circuito. São geralmente baseadas em modelos de organização biológica ou etológica, tais como Colônias de Formigas [SDB92]. Seu comportamento baseia-se no processo estímulo-resposta. A idéia fundamental é que um complexo comportamento “inteligente” pode emergir de uma coleção de entidades muito simples. Um exemplo de arquitetura reativa pode ser visto em [BRO86] e [WOJ95].
- **Arquiteturas Cognitivas ou Deliberativas, ou ainda BDI:** São aquelas para as quais a escolha da ação é feita através de uma deliberação explícita sobre diferentes opções, por exemplo, usando um modelo interno simbólico do mundo, um plano ou considerando alguma função que avalia uma ação conforme a sua utilidade. Aqui o processamento simbólico é fundamental para a teoria da ação, sendo assim, um Agente executa uma ação inteligente quando, possuindo um certo objetivo e o conhecimento de que uma certa ação o conduzirá a este objetivo, o Agente seleciona esta ação. Um exemplo de arquitetura BDI pode ser visto em [RAG91], [RAG95].
- **Arquiteturas Híbridas:** Encontra-se numa posição intermediária, em que a escolha da ação é feita usando alguma combinação entre as técnicas usadas nos tipos não deliberativos e nos tipos deliberativos. Pretendem dotar o Agente com capacidades reativas apropriadas, visando a solucionar a incapacidade de ação adequada por parte de um Agente puramente deliberativo quando deve tomar uma decisão rápida ao enfrentar uma situação imprevista. De forma complementar, é também dotado de capacidades de raciocínio e planejamento, para superar a incapacidade de se descobrir alternativas para o comportamento de um Agente puramente

reativo, quando a situação do mundo diverge bastante de seus objetivos iniciais. Um exemplo típico de arquitetura híbrida está em [MUL96].

Com a finalização do item arquitetura chega-se ao final desse capítulo. No próximo serão vistos dois mecanismos de construção de software inspirados na natureza bastante estudados atualmente e que servirão para auxiliar na solução do objeto de pesquisa desse trabalho.

Faz-se importante salientar, que o objetivo desse capítulo era dar uma introdução clara e concisa do que vem a ser um agente de software.

## 2. Algoritmos Inspirados na Natureza

### 2.1 Introdução

Problemas de otimização, na sua forma geral, têm como objetivo maximizar ou minimizar uma função definida sobre um certo domínio. A teoria clássica de otimização trata do caso em que o domínio é infinito. Já no caso dos chamados problemas de otimização combinatória, o domínio é tipicamente finito; além disso, em geral é fácil listar os seus elementos e também testar se um dado elemento pertence a esse domínio. Ainda assim, a idéia ingênua de testar todos os elementos deste domínio na busca pelo melhor mostra-se inviável na prática, mesmo para instâncias de tamanho moderado. Por outro lado, nem sempre existem métodos exatos, ainda que não ingênuos, para solucionar tais problemas.

O desenvolvimento de algoritmos baseados em heurísticas surgiu com a impossibilidade de se resolver satisfatoriamente diversos problemas de otimização NP-difíceis. A dificuldade referida é sob a hipótese de que  $P \neq NP$ , isto é, de se encontrar algoritmos eficientes para esses problemas.

Do ponto de vista computacional, heurísticas são critérios ou métodos utilizados para decidir o caminho mais eficiente entre várias alternativas de ação na busca de um determinado objetivo, no entanto não necessita encontrar o *melhor* caminho entre todas as alternativas possíveis. Observa-se em [POL48] um interessante e importante texto pioneiro no que diz respeito a heurísticas, que apesar de não possuir um apelo computacional mostra com clareza alguns caminhos para se chegar às mesmas. A partir dos anos 70, com o desenvolvimento da teoria de complexidade de algoritmos, viu-se que muitos problemas de otimização combinatória são intratáveis computacionalmente, com isso, houve uma procura por métodos que pudessem reduzir o espaço de busca das soluções, culminando com um esforço concentrado no estudo das heurísticas, que ganharam muito em sofisticação e desempenho.

Só para se ter uma idéia da complexidade de tais problemas, como exemplo pode-se tomar o problema do caixeiro viajante. Considerando que o mesmo tenha  $N$  nós (cidades) para percorrer. Será  $(N-1)!$  a quantidade total de caminhos a percorrer, onde para uma instância de 20 cidades e com um computador que possa examinar cada solução em um tempo de  $10^{-9}$  segundos ( 1 nano segundo) serão necessários nada menos que 80 anos para se encontrar a solução usando um algoritmo exaustivo e para  $N = 21$  um total de 1680 anos com o mesmo algoritmo.

O estudo formal de heurísticas busca entender o papel do conhecimento heurístico, incluindo projeto, análise, razões para sucesso ou falha. Até então muito se tem feito para o desenvolvimento de heurísticas inteligentes e eficientes que possam ser usadas na solução de problemas práticos de grande dimensão.

Algoritmos inspirados na natureza são métodos computacionais para resolver, de maneira aproximada, problemas de otimização combinatória para os quais não é possível obter soluções em um tempo computacional razoável, mesmo usando um computador bastante poderoso. Também têm inspiração no comportamento animal ou em mecanismos biológicos. No entanto não possuem necessariamente plausibilidade biológica. Tais algoritmos organizam e direcionam a busca podendo atuar sobre outros métodos, ditos subordinados, tais como métodos de busca local.

Enquanto as heurísticas de modo geral, para problemas multimodalidade, tendem a cair em ótimos locais, os quais na maioria das vezes não são soluções de boa qualidade, os métodos inspirados na natureza são desenvolvidos no sentido de evitar as armadilhas impostas pelos ótimos locais, permitindo que a busca continue, mesmo após um ótimo local ser detectado e podem ser vistas como versões melhoradas de algoritmos de busca local. São também consideradas heurísticas de uso geral.

Em linhas gerais, tal como as heurísticas, tais métodos também não buscam atingir uma solução ótima, mas soluções que possuam um certo grau aceitável, segundo algum critério pré-definido, qualidade na solução. Nessa situação, parece razoável sacrificar a condição ótima em troca da garantia de uma solução aproximada eficiente. Certamente, o interesse é, apesar de sacrificar o estado ótimo, fazê-lo de forma que ainda possa-se dar boas garantias sobre o valor da

solução obtida, procurando ganhar o máximo em termos de eficiência computacional. Esse compromisso entre perda do ótimo e ganho em eficiência é o paradigma dos algoritmos baseados na natureza.

Nesse trabalho, a atenção será concentrada em dois importantes métodos. A Computação Evolutiva, mais especificamente falando, os Algoritmos Genéticos e Sistemas de Formigas. No entanto, esse capítulo está longe de ter por objetivo mostrar o estado da arte dessas duas técnicas, antes procura fazer uma contextualização para que o modelo a ser futuramente apresentado possa ser amplamente compreendido.

## **2.2 Computação Evolutiva**

A Computação Evolutiva (doravante CE) consiste em um enfoque alternativo para a abordagem de problemas complexos de busca e aprendizagem através de modelos computacionais de processos evolutivos. A implementação concreta de tais modelos é conhecida como Algoritmos Evolutivos. Seu propósito geral consiste em realizar uma busca estocástica fazendo evoluir um conjunto de estruturas e selecionando, de modo iterativo, as mais adequadas. Sua principal vantagem é o fato de oferecer ganho em termos de flexibilidade e adaptabilidade, combinada a um desempenho robusto, e características de buscas globais; em comparação com técnicas tradicionais. De fato, a CE deve ser entendida como um conceito genérico adaptável de solução de problemas, principalmente no que diz respeito a solução de complexos problemas de otimização.

É importante que fique claro que o objetivo da CE não é simular processos naturais, além do que, com frequência não existe uma plausibilidade biológica entre o sistema computacional e o natural. O grande objetivo é uma emulação de tais processos. Dessa forma, os Algoritmos Evolutivos serão tanto melhores quanto mais aceitáveis, precisos e ótimos forem seus resultados, os quais correspondem à solução do problema em questão.

A Computação Evolutiva origina-se de quatro abordagens fortemente relacionadas, mas independentemente desenvolvidas, que são: Algoritmos Genéticos, Programação Evolutiva, Estratégias Evolutivas e Programação Genética.

Para que a CE possa emular o processo natural seus algoritmos devem dispor de:

- Uma população de possíveis soluções devidamente representada através de indivíduos;
- Um procedimento de seleção baseado na aptidão dos indivíduos;
- Um procedimento de transformação, isto é, de construção de novas soluções a partir das que se encontram disponíveis no momento.

Das quatro abordagens de CE mencionadas acima, esse trabalho tratará especificamente de Algoritmos Genéticos (AG).

### **2.2.1 Algoritmos Genéticos.**

Os Algoritmos Genéticos são métodos adaptativos que podem ser usados para resolver problemas de busca e otimização. Estão inspirados no processo genético e evolutivo dos organismos vivos. Inicialmente foram introduzidos por Holland, [HOL62], [HOL75], [HOL78], da Universidade de Michigan – USA – e mais tarde estudados por De Jong, [DEJ75], [DEJ87]; Goldeberg, [GOL85]; Davis, [DAV91]; Eshelman, [ESS95]; entre outros.

Holland, trabalhando na tentativa de fundamentar uma teoria geral de sistemas de adaptação robusta acabou encontrando um caminho de grande e imediata aplicabilidade prática na determinação de máximos e mínimos de funções matemáticas, o que facilitou bastante a aceitação dos AG nos meios acadêmicos.

De modo geral, os AG podem ser vistos como uma parte da CE que encontrou a possibilidade de aplicação geral e que possui algumas interessantes características, tais como:



- Operam em conjuntos de pontos, populações e não a partir de pontos isolados;
- Operam em um espaço de soluções codificadas e não diretamente no espaço de busca;
- Necessitam como informação somente o valor de uma função objetivo, denominada função de adaptabilidade ou *fitness*. Em outras palavras necessitam de pouco conhecimento específico, o que os torna versáteis; no entanto podem incorporar tais conhecimentos com pouco esforço;
- São muito flexíveis, ou seja, podem ser facilmente adaptados a novas idéias, problemas, bem como participarem como componentes de métodos híbridos;
- São facilmente implementados em microcomputadores, proporcionando resultados altamente aceitáveis;
- Usam transições probabilísticas e não regras deterministas.

Ao longo das gerações, as populações evoluem na natureza de acordo com os princípios de seleção natural e sobrevivência dos mais fortes, postulados em [DAR59]. Por imitação desse processo, os AG são capazes de criar soluções para problemas do mundo real. A evolução de tais soluções, bem como a obtenção de valores ótimos para o problema depende, em parte, de uma codificação adequada para as mesmas.

Na natureza, os indivíduos de uma população competem entre si em busca de recursos como: comida, água, abrigo. Considerando-se apenas indivíduos de uma mesma espécie, os mesmos competem também na busca de um companheiro. Os que conseguem sobreviver e encontrar um companheiro tem maior probabilidade de gerar descendentes. Isto significa que os genes dos indivíduos dos melhores adaptados se propagarão em sucessivas gerações constituindo um número de indivíduos crescente. A combinação de boas características provenientes de diferentes ancestrais pode, às vezes, produzir descendentes "superindivíduos", cuja adaptação é muito maior que a de seus ancestrais. Dessa forma, as espécies evoluem, logrando características cada vez melhores adaptadas no ambiente em que vivem.

A cada indivíduo se associa um grau de aptidão, o que determina a sua capacidade de competir com os demais membros da população. Quanto maior a sua aptidão maior a probabilidade do mesmo ser selecionado para se reproduzir, cruzando seu material genético com o de outro indivíduo selecionado de igual forma. Este cruzamento produzirá novos indivíduos – descendentes dos anteriores – os quais compartilham algumas características de seus pais.

Quanto menor for o seu grau de aptidão, menor será sua probabilidade de ser selecionado para reprodução, e conseqüentemente que seu material genético se propague por sucessivas gerações.

Dessa forma, se produz uma nova população de possíveis soluções, a qual substitui a anterior por possuir características mais promissoras em relação à população ótima.

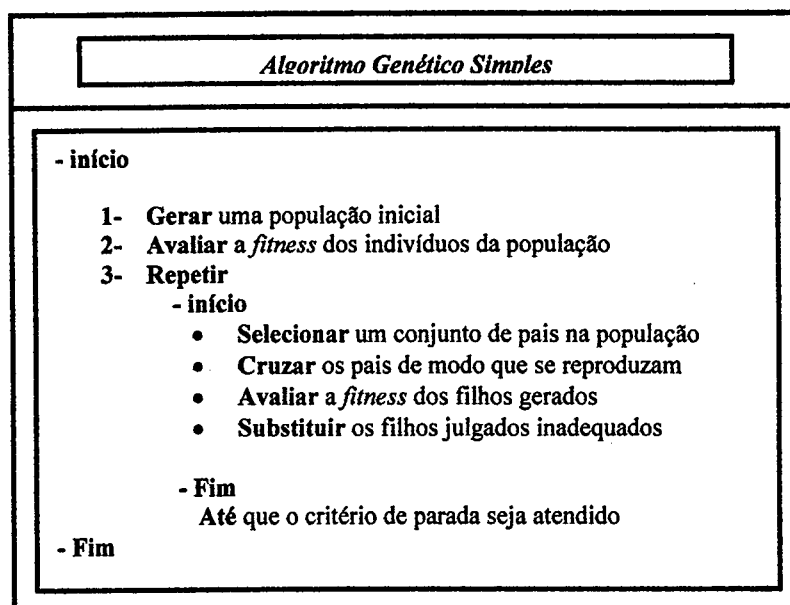
Assim, ao longo das gerações as boas características se propagam. Favorecendo, dessa forma, a exploração das áreas mais promissoras do espaço de busca. Sendo os AG bem projetados, as chances de se obter o ótimo global para o problema em questão são excelentes.

O poder dos AG está do fato de se tratar de uma técnica robusta, podendo manipular com êxito uma grande variedade de problemas provenientes das mais diferentes áreas, incluindo aqueles que os outros métodos encontram dificuldades para resolver.

Apesar de não se garantir que os AG encontrem a solução ótima do problema, existem evidências empíricas que respostas aceitáveis podem ser obtidas em um tempo bastante razoável.

No caso da existência de técnicas especializadas para resolver um determinado problema, o mais provável é que os AG sejam superados, tanto em eficácia quanto em rapidez. Seu grande campo de aplicação se encontra na tentativa de solução de problemas para os quais não existem bons algoritmos específicos.

Com o discutido anteriormente pode-se agora passar a descrever genericamente um AG.



Durante a execução do algoritmo, os pais devem ser selecionados para a reprodução, estes serão cruzados para que se possa obter os filhos, sobre os quais deverá atuar o operador de mutação. O resultado dessas combinações será um conjunto de indivíduos, que com a evolução do AG formará parte da próxima população.

### 2.2.1.1 Codificação

Os indivíduos, componentes da população podem ser representados como um conjunto de parâmetros (denominados genes), que juntos formam uma coleção de valores (referidos daqui por diante como cromossomos<sup>1</sup>).

Apesar do alfabeto utilizado para representar os indivíduos não necessitar estar em  $\{0,1\}$ , a teoria que fundamenta os AG está aí incluída.

Em termos biológicos, o conjunto que representa um cromossomo particular é chamado de fenótipo. O fenótipo contém a informação requerida para construir um organismo, o qual é chamado de genótipo. Os mesmos termos são utilizados em AG [ESS95].

A adaptação de um indivíduo ao problema depende da avaliação de seu genótipo. Tal análise pode dar-se a partir do seu fenótipo, ou seja, pode ser calculada levando em conta o seu cromossomo usando a função de adaptação ou de avaliação. A função de adaptação deve ser projetada especificamente para cada problema. Dado um cromossomo, a função associa um número real, que se supõem refletir o nível de adaptação do indivíduo representado pelo cromossomo ao problema.

Como exemplo de representação pode-se analisar o seguinte problema proposto por [MIC92], onde o objetivo é maximizar a função  $f(x) = |11 * num(x) - 150|$ , onde a função  $num(x)$  fornece o número de "1s" do vetor de cromossomos. Por exemplo, se  $x = (101001)$  então  $num(x) = 3$ .

Considere agora a representação binária de dois cromossomos compostos de trinta genes.

- $P_1 = (101010101010101010101010101010)$
- $P_2 = (110000001100001110000000000000)$

então  $f(P_1) = |11 * num(P_1) - 150| = |11 * 15 - 150| = 15$  e  $f(P_2) = |11 * num(P_2) - 150| = |11 * 7 - 150| = 73$ .

A partir daí não é difícil observar que o cromossomo que fornece um ponto de máximo local é dado por:

- $P_0 = (000000000000000000000000000000)$ , com  $f(P_0) = 150$

sendo que o máximo global de  $f$  é fornecido pelo cromossomo

- $P^* = (111111111111111111111111111111)$ , com  $f(P^*) = 180$ .

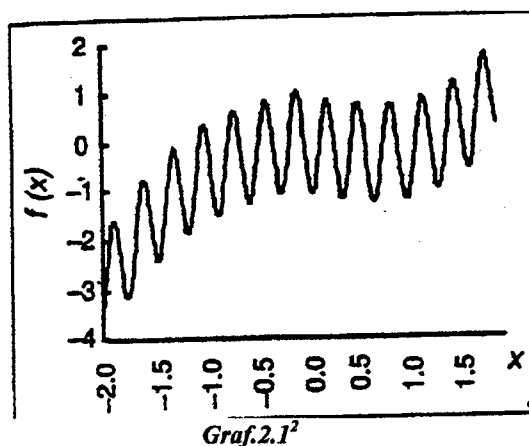
Um outro exemplo, também de representação binária, dado em [TAN95]. O problema consiste em maximizar uma função

$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  dada por  $f(x) = \cos(20x) - \frac{|x|}{2} + \frac{x^3}{4}$  no intervalo  $-2 \leq x \leq 2$ . Pode ser visto

<sup>1</sup> Tanto faz utilizar cromossomas quanto cromossomos. São sinônimos.

em graf.2.1 a ilustração da função. Observe que a mesma é não linear, com nada menos do que 13 picos no intervalo de interesse, sendo que, o que corresponde ao máximo global, ou ótimo global é  $x^* \approx 1,88929$ , ou seja:

$$f(x^*) \approx 1,73752 \geq f(x), \forall -2 \leq x \leq 2.$$



Uma vez que a expressão analítica é conhecida pode-se encontrar os pontos extremos igualando-se a derivada primeira a zero e resolvendo a equação transcendental resultante numericamente. No entanto, caso a expressão analítica não seja conhecida, métodos numéricos são impotentes. Uma observação também importante é que por se tratar de uma função com multimodalidade, puros métodos de gradiente geralmente não são capazes de encontrar o ótimo global.

Para cada problema a ser resolvido usando AG, encontrar uma representação cromossômica conveniente é sempre o primeiro passo. Nesse caso será usado um vetor binário para representar cada ponto do espaço de busca. Uma vez que existe um número infinito de pontos no intervalo de interesse, a dimensão desse vetor ou sequência binária depende da precisão requerida para o problema.

Considere uma precisão de 4 casas decimais. Como o espaço de busca tem tamanho, ou seja, largura  $2 - (-2) = 4$ , essa precisão diz que o processo de busca

<sup>2</sup> Figura extraída de [TAN95].

deve distinguir pelo menos  $4 \times 10^4 = 40.000$  pontos. Sendo assim, seqüências binárias de ao menos 16 bits são necessárias, pois:

$$32.766 = 2^{15} < 40.000 < 2^{16} = 65.536$$

Usando cromossomos binários de dimensão 16, divide-se o intervalo de busca em  $2^{16}$  partes iguais e usa-se um mapeamento linear de cada seqüência binária para o número  $x$ , no intervalo. Utilizando a notação binária posicional, cada possível solução  $x$  será representada por uma seqüência  $s = [b_{15}b_{14}...b_2b_1b_0]$ , onde cada  $b_i \in \{0, 1\}$ . A decodificação de um cromossomo é feita em duas partes: primeiro converte-se o cromossomo da base 2 para a base 10 de acordo com:

$$s = [b_{15}b_{14}...b_2b_1b_0] = \sum_{i=0}^{15} b_i 2^i = \bar{x},$$

o que resulta em um valor discreto  $x \in \mathbb{N}; 0 \leq x \leq 2^{16} - 1 = 65.535$ . No próximo passo,  $\bar{x}$  é mapeado de volta ao espaço de busca de acordo com:

$$x = -x_{\min} + \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^{16} - 1} \bar{x},$$

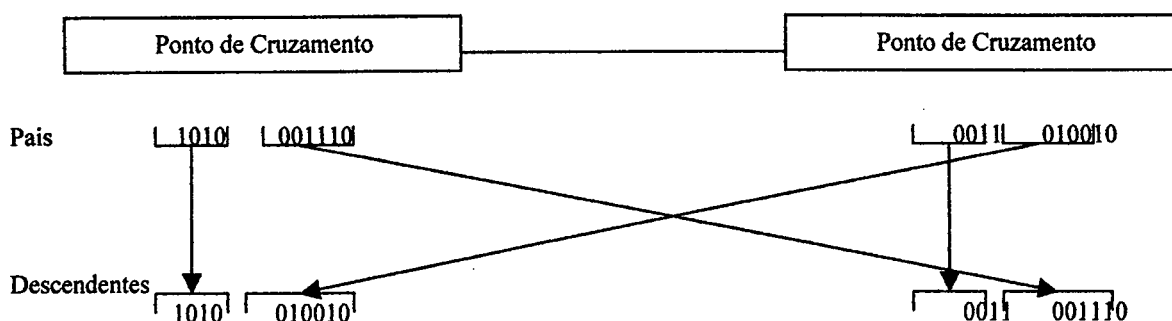
onde  $x_{\min}$  e  $x_{\max}$  indicam os limites do intervalo de busca e são, neste exemplo, -2 e 2, respectivamente. Obviamente, os cromossomos [0000000000000000] e [1111111111111111] correspondem a esses limites [TAN95].

### 2.2.1.2 Cruzamento

O operador de cruzamento toma dois pais selecionados e secciona os seus cromossomos em uma posição escolhida aleatoriamente, produzindo dessa forma dois pedaços em cada pai. Posteriormente são intercalados os pedaços obtidos gerando-se assim novos cromossomos completos, figura 2.1. Ambos os descendentes herdam características (genes) de cada um dos pais.

Habitualmente o operador de cruzamento não se aplica a todos os pares de indivíduos que tenham sido seleccionados. Somente aqueles com probabilidade entre 0.5 e 1.0, como pode ser visto em [GOL85].

No caso em que o operador não se aplica, a descendência se obtém simplesmente duplicando os pais.

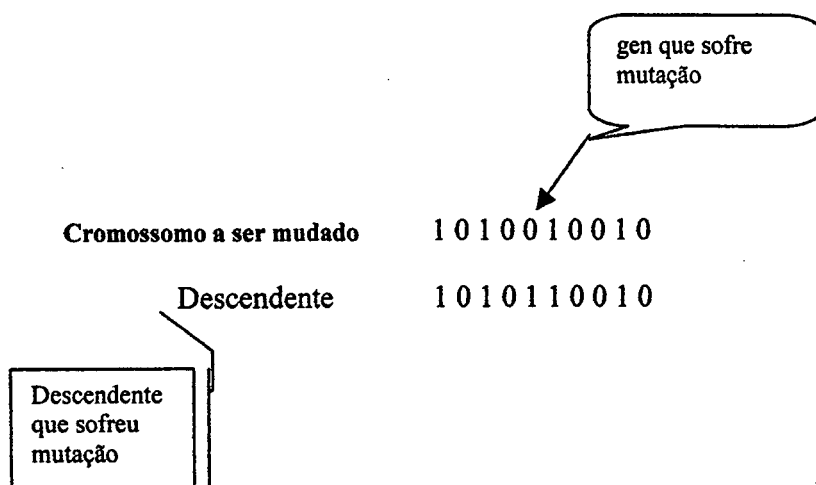


*Figura 2.1: Operador de cruzamento baseado em um ponto.*

### 2.2.1.3 Mutação

O operador de mutação se aplica a cada filho de maneira individual, e consiste em uma alteração, de maneira aleatória (normalmente com probabilidade pequena), de cada gene componente do cromossomo. A figura 2.2 mostra a mutação do quinto gene do cromossomo.

Pode-se pensar a princípio que o operador de cruzamento é mais importante que o operador de mutação, já que proporciona uma exploração rápida do espaço de busca. No entanto, esse último garante que nenhum ponto do espaço de busca tenha probabilidade zero para ser examinado, e é de fundamental importância para assegurar a convergência dos AG.



*Figura 2.2: Operador de Mutação.*

Para critérios práticos é de grande importância a definição de convergência introduzida por De Jong, em sua tese de doutorado, [DEJ75]. Se o AG foi corretamente implementado, a população evoluirá ao longo das gerações sucessivas de tal forma que a adaptação média estendida a todos os indivíduos da população, assim como a adaptação do melhor indivíduo será incrementada de tal forma a convergir para o ótimo global.

O conceito de convergência está relacionado com a idéia de progressão para a uniformidade, ou seja, um gene terá convergido quando ao menos 95% dos indivíduos da população compartilharem do mesmo valor desse gene. A população converge quando todos os genes tiverem convergido. Tal definição pode ser generalizada no caso em que ao menos um pouco dos indivíduos da população houverem convergido.

À medida que o número de gerações aumenta, é mais provável que a adaptação média se aproxime do melhor indivíduo.

Mais detalhes sobre AG, bem como exemplos podem ser vistos em [GOL89].

No campo dos AG existem alguns termos que ficaram consagrados em virtude do uso e também da similaridade conceitual com a área da Evolução. Apesar de muitos, ou quase todos, já terem sido mencionados é importante que fiquem bem registrados no trabalho. Segue uma pequena lista com cada um, assim como sua definição:



- **População:** conjunto de indivíduos, isto é, conjunto de soluções do problema;
- **Cromossomo:** representa um indivíduo na população, ou seja, uma das muitas configurações da solução. De modo geral é definido como um vetor de componentes;
- **Fitness:** medida de aptidão de um indivíduo da população. Normalmente está relacionada, ou associada ao valor da função objetivo para uma dada solução;
- **Gene:** representa uma componente do cromossomo. Uma variável do problema;
- **Alelo:** descreve os possíveis estados de um atributo do indivíduo, isto é, os possíveis valores de uma variável do problema;
- **Locus:** representa a posição do atributo no cromossomo; a posição da componente no vetor de componentes.
- **Operadores genéticos:** são as regras que permitem a manipulação dos cromossomos. São basicamente:
  - **Crossover** (cruzamento), ou operador que permite a obtenção de indivíduos filhos a partir da combinação(cruzamento) dos cromossomos dos pais;
  - **Mutação**, ou operador que permite a produção de um novo indivíduo por alterações diretas no cromossomo pai;
  - **Fenótipo:** denota o cromossomo decodificado;
  - **Genótipo:** representa a estrutura do cromossomo codificado;
  - **Schema:** é um modelo de representação para um família de cromossomos, de modo geral é representado por \*(asterisco) dentro do cromossomo.

Para se obter maiores detalhes a respeito do exposto e da área de AG como um todo é recomendado [GOL89], [DAV91], [MIC92], onde os autores mostram uma ampla e clara visão do assunto. Um texto bastante atual e que vem de encontro ao tema específico desse trabalho, ou seja, a solução de problemas de otimização

utilizando-se meta-heurísticas é [MIF00], no qual o autor trata a solução de diversos problemas nas mais variadas circunstâncias e restrições.

## 2.3 Sistema de Formigas

Dá-se o nome de Sistema de Formigas à metáfora natural na qual se baseiam algoritmos de formigas.

Suponha-se que exista um formigueiro isolado em algum lugar no meio do mato. Para se chegar a qualquer forma de comida é necessário atravessar uma ponte composta de duas bifurcações de mesmo tamanho. Embora as formigas sejam totalmente livres para optar pela bifurcação da esquerda ou da direita nota-se rapidamente que quase todas as formigas usam uma mesma bifurcação, embora não haja nenhuma razão aparente para que esta escolha seja feita. No entanto, uma observação mais cuidadosa mostra que a trajetória das formigas através daquela bifurcação, de mesmo tamanho que a outra, chega-se mais rapidamente (por um menor caminho) à fonte de comida; que é o objetivo das formigas. Esse fenômeno é explicado pelo fato de que as formigas ao caminharem depositam no chão uma substância chamada feromônio [BDG92].

Uma formiga real é modelada como um processo probabilístico, ou seja, na ausência de feromônio a formiga explora a área em busca de seus elementos de necessidade de forma totalmente randômica [GOS89]. Caso o feromônio esteja presente, a formiga segue a trilha formada pelo depósito da substância com uma alta probabilidade. Caso duas trilhas contendo feromônio se cruzem a probabilidade de as formigas seguirem aquela com maior quantidade de feromônio é muito maior.

Na figura 2.3, extraída de [DOG 97] a idéia pode ser bem entendida. Em (a) observa-se as formigas chegarem a um ponto no qual elas devem decidir se tomam a direita ou a esquerda. Uma vez que não está claro sobre o que fazer, a escolha é feita de forma randômica. Pode-se esperar que, na média, cada caminho receba metade das formigas. Isso pode ser vista pelas formigas nomeadas de R (direita) e L (esquerda). Em (b) e (c) vê-se que, após alguns instantes, supondo-se que as formigas andam na mesma velocidade a quantidade de formigas em cada caminho

começa a mudar. Note que as linhas pontilhadas significam a quantidade de feromônio depositado ao longo do caminho. Finalmente em (d) é possível ver a diferença da quantidade de formigas nos dois caminhos. O caminho que tem mais formigas é o menor. Veja também que a concentração de feromônio é bem maior nesse caminho.

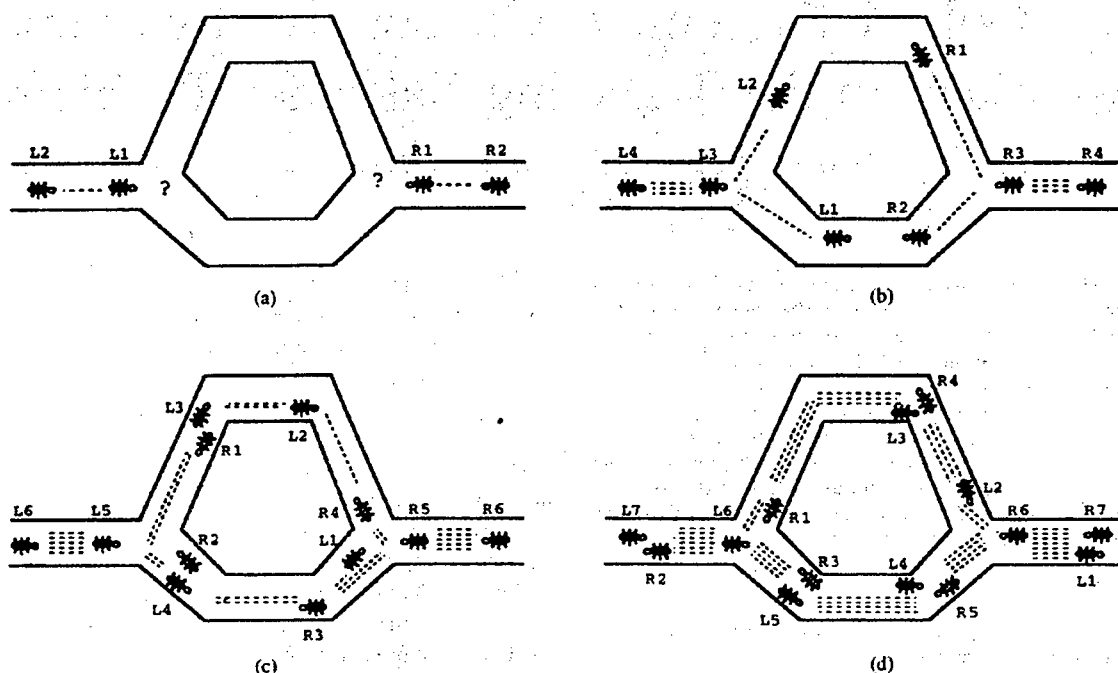


figura 2.3 Formigas e seus caminhos – extraída de [DOG97]

A interessante idéia mostrada acima, onde as formigas sempre seguem pelo menor caminho tem sido largamente aplicada na solução de problemas de otimização, como o problema do caixeiro viajante [DMC96].

Pensando-se em um problema de caminho qualquer sobre um grafo pode-se chamar de  $\delta(r,s)$  o custo (ou distância) de percorrer um aresta do grafo, cada arco  $(r,s)$  tem uma medida  $\iota(r,s)$  chamada de feromônio, a qual é atualizada a partir de uma medida de tempo pré-definida. Dessa forma cada formiga realiza um passeio completo pelo grafo percorrendo cada nó de acordo com uma *regra de transição de estado* probabilística. As formigas preferem mover-se para os nós

conectados pelos menores arcos com uma maior quantidade de feromônio. No momento em que todas as formigas completam seus passeios, *uma regra global de atualização de feromônio* é aplicada; sendo que uma fração de feromônio evapora ao mesmo tempo, em algumas arestas a substância é reforçada de acordo com a quantidade de formigas que por eles passaram. Obviamente tais arcos são aqueles de menor tamanho. É um processo iterativo [DOG97].

A *regra de transição de estado*, nesse ponto é conhecida como *regra randômica proporcional*, e é dada pela equação (1) que se segue:

$$p_k(r,s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r,s)] * [\eta(r,s)]^\beta}{\sum_{u \in J_k(r)} [\tau(r,s)] * [\eta(r,s)]^\beta} \\ \text{Caso...contrário} \\ 0 \end{cases}$$

*equação 1 – Regra Proporcional Randômica*

Essa equação mostra a probabilidade de escolha para uma formiga  $k$  escolher sair de um nó  $r$  e mover-se para um nó  $s$ . Tem-se também que  $\tau$  é o feromônio,  $\eta = 1/\delta$  é o inverso da distância (também conhecida como custo)  $\delta(r,s)$ ,  $J_k(r)$  é o conjunto de nós que ainda restam ser visitados pela formiga  $k$  posicionada no nó  $r$ , e  $\beta$  é um parâmetro que determina a importância relativa de feromônio versus a distância ( $\beta > 0$ ).

Observe que o feromônio no arco  $(r,s)$  é multiplicado por um valor heurístico  $\eta(r,s)$  (inverso do custo), favorecendo assim aos arcos de menor tamanho e com mais concentração de feromônio.

No sistema de formigas a *regra de atualização global* (do feromônio) é implementada pela equação (2), como se segue:

$$\tau(r,s) \leftarrow (1-\alpha) * \tau(r,s) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_k(r,s)$$

Onde

$$\Delta\tau_k(r,s) = \begin{cases} \frac{1}{L_k}, & \text{se } (r,s) \in \text{ao caminho percorrido pela formiga } k \\ \text{Caso contrário} \\ 0 \end{cases}$$

*equação 2 – Regra de Atualização Global*

Na equação acima,  $0 < \alpha < 1$  é parâmetro que indica a diminuição de feromônio,  $L_k$  é o tamanho do caminho percorrido pela formiga  $k$ , e  $m$  é o número de formigas.

A atualização do feromônio tem por objetivo alocar maior quantidade do produto nos menores caminhos. Nesse sentido pode-se observar uma similaridade bastante grande com um aprendizado por reforço. Isso também ocorre nos AG. No entanto, a fórmula trata também da evaporação de feromônio no caso de arcos maiores e conseqüentemente menos visitados.

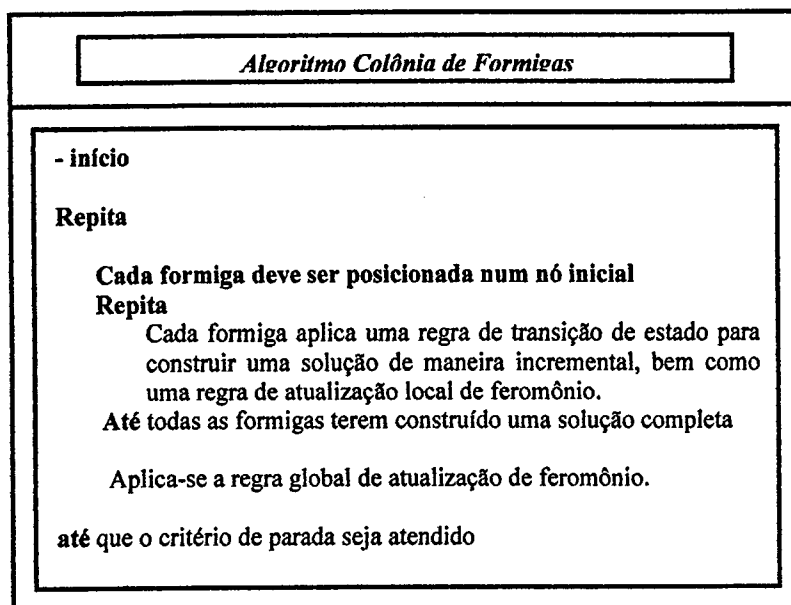
Ambas as equações acima podem ser vistas com maiores detalhes em [DOG97], de onde foram extraídas.

O feromônio colocado nos arcos do grafo comporta-se como uma memória. Tal memória não se encontra armazenada localmente, individualmente com cada formiga, mas encontra-se distribuída nos arcos; maiores detalhes a esse respeito podem ser vistos em [DMC96].

Essas seriam as idéias básicas e fundamentais a respeito da metáfora de formigas. Na literatura pode-se observar modificações que tendem a melhorar o desempenho do sistema como um todo, passando o mesmo a se chamar Sistema de Colônia de Formigas [DOG97]. Dessa forma pode-se ressaltar três diferenças fundamentais entre Sistema de Formigas e Sistema de Colônias de Formigas. *i)* primeiramente a *regra de transição de estado* proporciona uma maneira de se equilibrar a investigação de novos arcos e a utilização do conhecimento acumulado *a priori* a respeito do problema, *ii)* a *regra de atualização global* é aplicada somente nos arcos que pertencem ao melhor caminho percorrido pela formiga, *iii)* enquanto

as formigas constroem uma solução *uma regra de atualização local de feromônio* é aplicada. A partir daí o algoritmo abaixo foi desenvolvido.

Maiores detalhes acerca dessas modificações, equações, exemplificações podem ser vistos em [DOG 97] e [DMC96].



Além dessas modificações, outras, mais atuais, encontram-se relatadas na literatura. Pode-se observar uma melhora substancial não só na velocidade de solução dos problemas, mas na exatidão da convergência, bem como na organização geral dos algoritmos baseados na metáfora de formigas. Algumas delas encontram-se em [TAI99], [GTD97], [STD99].

Como já foi mencionado anteriormente esse capítulo não tem a pretensão de apresentar o estado da arte dos algoritmos genéticos e sistemas de formigas. No capítulo 4, onde será apresentado o modelo de agente que se ocupa esse trabalho, tais técnicas serão mencionadas, daí a necessidade da contextualização. E em função disso também não foi feito um maior aprofundamento em ambos os temas, podendo os mesmos ser tratados assim, de forma mais superficial.

### 3. Otimização da Distribuição

#### 3.1 Introdução

A primeira coisa em que se pensa quando é abordada a questão da dificuldade de um problema computacional é a questão do tempo, isto é, quão demorada é a execução de uma instância do problema no computador. A partir disso pode-se definir o termo *complexidade de tempo*, que nada mais é que uma função que relaciona o tamanho de uma instância do problema ao tempo necessário para resolvê-la [TER91]. Não serão tratadas nesse trabalho dificuldades relativas à quantidade de espaço necessário.

Para um problema qualquer é possível em princípio, ter vários algoritmos para resolvê-lo, cada qual com complexidades diferentes. De acordo com a complexidade tais problemas podem ser classificados, de modo geral como P (polinomial), NP (polinomial não determinista, não polinomial), NP-difícil e NP-completo. Uma descrição mais detalhada sobre complexidade em tempo e classe de problemas sai do escopo do trabalho, no entanto, maiores detalhes podem ser vistos em [TER91] e [MAC94].

A seguir será feita uma breve introdução aos problemas do empacotamento tridimensional e do roteamento, assim como serão mostrados, comentadas soluções e avanços atuais para ambos os casos.

#### 3.2 Problema do Empacotamento Tridimensional

Nos últimos tempos, mais precisamente, nas últimas quatro décadas, os problemas de corte e empacotamento têm sido largamente investigados por um número crescente de pessoas, o que tem causado um avanço significativo na área, gerando benefícios para as indústrias, armazéns, manufaturas e empresas de modo geral.

Um dos pontos geradores do enorme interesse por esses problemas é a simplicidade com que os enunciados são elaborados, simplicidade que, do ponto de

vista da solução é apenas aparente. Outro seria a sua enorme aplicabilidade prática e conseqüente viabilidade econômica.

São problemas complexos, da classe *NP-difíceis* [GAJ79]. A pesquisa sobre esse assunto tem dado origem a diversos modelos matemáticos e tem desenvolvido uma variedade enorme de técnicas para lidar com sua usual dificuldade de tratamento computacional.

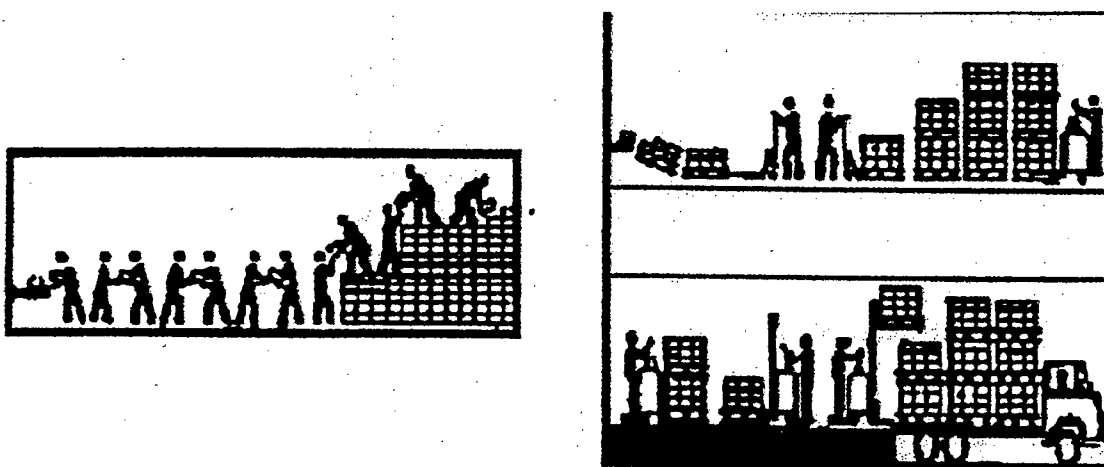
Falando especificamente da aplicabilidade prática desse problema pode ser citado o carregamento de contêineres de navios, carrocerias de caminhões e vagões de trens, armazenamento. Em vista disso, pequenas melhorias nos processos citados podem representar ganhos significativos em relação à concorrência, possibilidade de fornecimento de descontos para clientes, economia de espaço; o que no final resulta em aumento do lucro e/ou da qualidade do serviço prestado.

Como definição mais formal pode-se dizer que o problema do empacotamento tridimensional consiste de: dado um recipiente com dimensões especificadas e uma lista de itens, também com dimensões especificadas, determinar a melhor maneira de colocar estes itens dentro do recipiente; o que no final tem por objetivo diminuir os espaços ociosos que existem em recipientes que necessitam ser carregados.

Sem perda de generalidade, será abordado nesse trabalho o chamado problema do carregamento de paletes (PCP). O paletê (do inglês *pallet*) é uma plataforma de madeira, fibra ou outro material, disposto horizontalmente, na qual a carga pode ser empilhada e estabilizada [MAH85].

Algo interessante e que deve ser destacado em função do fato de afetar diretamente os custos logísticos, principalmente a eficiência dos sistemas de transporte e armazenagem, é a chamada operação formiga, isto é, a operação onde a carga é manuseada volume por volume ao longo da cadeia logística, vide figura 3.1(a). Com a paletização pode-se observar na figura 3.1(b) o quanto o transporte é economizado.





*figura 3.1(a) 3.1(b) Operação formiga e paletização*

O PCP é o problema de carregar produtos embalados em caixas sobre um palete retangular, de maneira a economizar espaços no palete. Supõe-se que as caixas, em geral disponíveis em grandes quantidades, devem ser arranjadas ortogonalmente, ou seja, com seus lados paralelos aos lados do palete. Conforme será visto as conclusões da resolução desse problema são perfeitamente aplicáveis ao arranjo físico de paletes sobre carrocerias de caminhões, e no projeto de embalagens de produtos, para formar unidades de carga intermediárias.

Em [HOD82] observa-se uma divisão do PCP em dois casos: o PCP do produtor e o PCP do distribuidor.

No PCP do produtor, os produtos fabricados por este são embalados em caixas iguais, de tamanho  $(l,w,h)$ . Tais caixas são então carregadas em camadas horizontais sobre paletes de tamanho  $(L,W,H)$ , onde  $H$  é a altura máxima do carregamento. A figura 3.1(b) mostra um padrão de empacotamento. Caso nenhuma orientação seja fixada, ou seja, se as caixas puderem ser carregadas sob qualquer uma de suas faces:  $lw$ ,  $lh$  e  $wh$ , tais restrições permitem decompor o PCP do produtor em dois sub-problemas:

- Para cada face das caixas, o problema bidimensional de arranjar ortogonalmente a quantidade máxima de retângulos (faces das caixas) dentro do retângulo que representa a superfície do palete;

- O problema, unidimensional, de distribuir o conjunto mais valioso de camadas ao longo da altura  $H$  do palete, onde o valor de cada camada corresponde ao número de caixas nela contidas. Observe que este é um problema da mochila [MAC94].

No PCP do distribuidor a situação é um pouco diferente, uma vez que esse recebe de diversos fornecedores produtos embalados em caixas de tamanhos diferentes  $(l_i, w_i, h_i)$ ,  $i=1,2,\dots,m$ . Estas caixas devem ser carregadas sobre a paleta, fig 3.1(b). É interessante notar que esse problema pode ser visto como um *problema de carregamento de contêineres*, [BIR95], [MOA94]. De modo particular, caso uma orientação vertical seja fixada, por exemplo, carregar as caixas sob a face  $l_i w_i$ , então o PCP do produtor reduz-se a um problema bidimensional de arranjar ortogonalmente retângulos  $(l_i, w_i)$  e  $(w_i, l_i)$ ,  $i=1,2,\dots,m$  dentro do retângulo  $(L,W)$ , que corresponde a dimensão do paleta, de maneira a maximizar a utilização de  $(L,W)$ .

De modo geral o PCP do produtor é muito mais abordado na literatura do que o PCP do distribuidor, no entanto, esse trabalho tratará especificamente desse último. Um dos motivos pelos quais isso ocorre é que os algoritmos que tratam tais modelos e problemas são bastante rígidos quanto a variação das restrições envolvidas.

Em [OLI97] e [OLI98], tem-se um trabalho cujo objetivo foi comparar as performances de dois algoritmos. O primeiro é a conhecida proposta de *Smith e De Cani* [SMD80] para o problema de carregamento de paletes. O segundo é uma implementação baseada em Algoritmo Genético. Os testes mostraram que o AG, para grandes quantidades de retângulos a serem carregados, supera o primeiro algoritmo gerando layouts muito próximos do ótimo em tempo bastante razoável. Uma outra coisa que chama bastante atenção nos resultados é que o desempenho continua razoável quando se altera o tamanho das caixas e/ou dos paletes.

Em [BOR94] também pode ser visto um bem sucedido trabalho, baseado em AG no qual, apesar da forte heterogeneidade dos itens a serem empacotados nas paletes, o tempo de solução é bem razoável.

Já [BIS91] apresenta um trabalho com resultados satisfatórios, porém usando uma técnica tradicional. O mesmo ocorre em [GMM90].

Aplicação interessante e bastante promissora é apresentada em [DAG90], onde o autor desenvolve um sistema baseado em conhecimento para problemas de corte e empacotamento de modo geral. De acordo com o seu modelo basta que o conhecimento acerca do PCP do distribuidor seja acrescentado para que os resultados possam ser obtidos. O artigo não apresenta resultados numéricos para esse caso especificamente.

Em [DOW90] observa-se a solução do problema com técnicas exatas e heurísticas. Esse artigo busca associar a solução de um problema de instância razoável com a utilização de um micro computador. Note que há 11 anos atrás os computadores possuíam desempenho inferior ao que se tem hoje, portanto tratava-se de algo bastante relevante.

Em [BIM90] vê-se um trabalho que apresenta heurísticas para a determinação eficiente de padrões de empacotamento para carregamento de contêineres com itens retangulares. O artigo faz uma análise comparativa de 14 regras heurísticas nas quais examina-se o impacto do número de diferentes tipos de itens.

Já [HAT90] apresenta um complexo procedimento heurístico baseado em computador para carregamento de containeres. Os produtos são comprados em grande quantidade e variedade pelos consumidores. Caminhões e carros dos mais variados tipos estão entre aqueles que serão carregados para o transporte das mercadorias. O procedimento desenvolvido tem ajudado bastante a melhorar o serviço de atendimento ao cliente.

### **3.3 Problema de roteamento**

Um sistema de roteamento pode ser considerado como um conjunto organizado de mecanismos que tem por finalidade o atendimento de demandas localizadas nos arcos ou nos nós de alguma rede de transporte. Como qualquer sistema operacional, o sistema de roteamento pode ser decomposto em três partes, sob a ótica da operação:

- Estratégica;
- Tática;
- Logística.

Segundo [BAB83] o maior objetivo da logística é fazer chegar provisões e/ou serviços a pontos de consumo, a partir de pontos de suprimento. Para que seja completo um sistema de logística deve ser capaz de controlar o processo de obtenção, estoque e distribuição de produtos sobre uma rede de demanda.

É comum em sistemas operacionais que decisões relativas à escolha de locais para depósitos ou fábricas sejam tomadas antes da definição detalhada da forma de distribuição dos itens fabricados. Em casos como esses pode ser observado que tais decisões são mais fortemente influenciadas por aspectos externos ao sistema e acabam por determinar sua organização. Decisões que envolvem a escolha acima, bem como mercado de atuação, dimensões da qualidade, localização de fábricas e depósitos, tipos de veículos, restrições legais são de ordem estratégicas.

Já aquelas que envolvem número de rotas, números de veículos que compõem a frota, contratação de mão-de-obra, regime de trabalho, localização das garagens, nível de estoque são de âmbito tático.

Quando se considera um sistema de roteamento como um todo, que é algo complexo e composto de importantes subsistemas fortemente acoplados, o objetivo é a otimização global do sistema. Para tanto é conveniente que o mesmo seja abordado em etapas, devido a sua alta complexidade.

Em um sistema como o descrito acima, não é difícil perceber que o mesmo deva possuir um plano efetivo e flexível de entregas. Tal plano deverá ser capaz de atender às especificações do nível de eficiência que se quer para o serviço de transporte. É nesse contexto que se pode definir de maneira clara um problema de características altamente combinatórias e de grande dificuldade de solução que é conhecido como problema de roteamento de veículos (PRV).

De modo geral o PRV envolve a área a ser servida pelos depósitos, capacidade dos veículos, o tamanho da frota alocada a cada depósito, regras que deverão definir as alocações do transporte a elementos da própria frota ou a veículos que eventualmente venham a ser contratados. A partir daí o objetivo será determinar um roteamento ou um sequenciamento das tarefas de modo a diminuir os custos de todas as atividades envolvidas.

Não é difícil perceber que o desenvolvimento de uma função objetivo que expresse tudo que envolve o problema de maneira apropriada é algo não muito trivial. Sendo assim, os custos devem ser diminuídos através da redução de:

- Prazo de entrega;
- Caminhos a percorrer (combustível, manutenção, tempo de operações);
- Emprego da mão-de-obra;
- Riscos de acidentes ou avarias;
- Número de veículos;
- Intervalos de trabalho;
- Carregamento (otimização da relação carga/rota/meio de transporte);
- Etc.

Pode-se observar nesse capítulo que um problema de fundamental importância prática é o que trata da distribuição. Tal questão é fundamental, no dia a dia; por envolver altos custos. Em [HOL86] vê-se que um atraso de um mês na entrega de produtos no comércio internacional pode contribuir com até 5% de acréscimo no produto final. Já [BAB83] mostra que a distribuição física dos produtos contribui com cerca de 16% do custo final do item. Por outro lado certos produtos necessitam de uma distribuição eficiente não só por motivos econômicos, mas também por questões de segurança. Como exemplos temos os casos de remédios e combustíveis.

O PRV tem sido alvo de atenção por parte de muitos pesquisadores nos últimos 30 anos, mas foi somente há 15 anos que o problema pode ser resolvido por algoritmos exatos para instâncias da ordem de 30 pontos de demanda, conforme pode ser visto em [BAB83]. Um fato que muito influenciou no surgimento de bons resultados que têm aparecido ultimamente na literatura foi a melhora substancial dos microcomputadores, bem como o surgimento de novas abordagens no trato de tais problemas.

Em [ACH97] vê-se uma bem sucedida aplicação na distribuição de um único produto para um único depósito de clientes com demanda conhecida. No artigo também é apresentada uma boa base teórica do problema.

Já [MHW01] apresenta uma abordagem baseada em agentes autônomos que coordenam um processo heurístico parametrizado para o roteamento. O foco é centrado em redes de comunicação. O roteamento de mensagens na rede apresenta instâncias em tempo real de um problema de otimização multi-critério em um ambiente incerto e dinâmico. A heurística parametrizada oferece uma poderosa e elegante ferramenta para a solução do problema. É interessante observar que uma rede como essa em muitos casos se assemelha a uma rede de distribuição de produtos.

Em [GOL94] tem-se uma Framework para especificação uniforme, simulação, otimização, avaliação e implementação de um sistema inteligente de rodovias e veículos. O grande objetivo é a minimização do congestionamento melhorando o fluxo de tráfego.

Pode ser visto em [CAD97] um interessantíssimo algoritmo de roteamento para redes de comunicação. É um agente distribuído e adaptativo inspirado na metáfora de colônias de formigas. O AntNet, como é chamado, foi comparado com outros algoritmos estáticos e adaptativos pertencentes ao estado da arte na área e o desempenho foi muito bom, apresentando grande robustez em todos os experimentos sob todas as condições.

Em [BAS00] é apresentada uma solução para um baixo congestionamento no roteamento utilizando-se algoritmos de restrições de coluna.

Em [STD99] é apresentado um algoritmo ACO (Ant Colony Optimization) para o problema do caixeiro viajante que nada mais é que um problema de roteamento com apenas um veículo. A abordagem baseada na metáfora de formigas apresentou excelentes resultados.

Interessantíssima aplicação e bem semelhante à tese que aqui se constitui está em [NUS97]. A aplicação consiste em um sistema baseado em conhecimento para apoio a decisão onde é totalmente refeito todo o sistema de distribuição de uma companhia de combustível Chilena. Os resultados foram muito bons.

Em [MJS98] tem-se um interessante trabalho onde se sintetiza toda a evolução da pesquisa em roteamento e localização nos últimos 30 anos, explorando oportunidades de pesquisa promissoras levando-se em conta aspectos práticos, projeto de algoritmos e modelos de complexidade.

Em [BRE99] tem-se um trabalho de comparação de heurísticas (busca tabu e recozimento simulado) para a solução do PRV. Já [VTP99] apresenta uma interessante aplicação, um modelo neurofuzzy é utilizado para a modelagem e solução do PRV com transporte. Finalmente em [PSP00] vê-se o roteamento em uma rede de computadores utilizando redes neurais artificiais.

Com isso é possível ver o quanto o PRV sob vários aspectos, inclusive sob o aspecto da distribuição tem sido investigados a partir das mais variadas técnicas, desde as mais rígidas e baseadas em fortes matemáticas até as metáforas mais interessantes, flexíveis e robustas como é o caso dos AG e de sistemas de formigas, passando por redes neurais [HAY94], recozimento simulado, busca tabu, conjuntos nebulosos [COS97].

A partir do que foi exposto chega-se a o fim desse capítulo. O objetivo do mesmo foi abordar alguns problemas de difícil solução e mostrar que o que se tem de resultado ainda não é de tudo satisfatório. Podendo, obviamente ser melhorado. Como nos demais não se teve aqui a intenção de se mostrar o estado da arte de tais problemas, mas antes propiciar subsídios e contextualizações.

## 4. Agente Formigueiro - AgeFor

### 4.1 Introdução

No capítulo de introdução desse mostrou-se claramente o objetivo do trabalho. Agora será descrito um *problema exemplo* para que possa ser obtida uma maior contextualização.

O problema consiste em um sistema de distribuição de cargas realizado por uma transportadora hipotética com sede em Videira e com filiais em Curitiba, Lages, Porto Alegre, Blumenau, Florianópolis e Joinville.

Apesar de ter sido fixado o número de filiais o mesmo pode crescer para um número elevado se for o caso.

Inicialmente pode-se imaginar uma carga sendo enviada de Videira para Porto Alegre. Um primeiro problema que surge é como dispor a carga no interior do caminhão de modo que o espaço seja aproveitado ao máximo. Um segundo poderá surgir quando o mesmo se dirige a Lages (caminho para Porto Alegre). Durante o tempo de percurso desse primeiro trecho a filial Lages pode receber um encomenda para ser enviada para Florianópolis. Ao mesmo tempo tem conhecimento de que está vindo um caminhão de Curitiba com destino a Porto Alegre. Daí surge a pergunta. Será que não seria melhor descarregar o caminhão que vem de Videira e carregá-lo com a carga para Florianópolis e enviar a carga para Porto Alegre através do caminhão que está vindo de Curitiba?

Para que seja tomada tal decisão tem que se analisar vários aspectos, tais como. Será que a carga que vem no caminhão de Videira cabe no caminhão que vem de Curitiba, uma vez que o mesmo encontra-se carregado? Vale a pena descarregar e recarregar? Se a carga não couber toda no Caminhão de Curitiba é viável mandá-la por partes? Haverá algum ganho com essa operação? É compensatório segundo as restrições que envolvem o problema, tais como tempo, custo, percurso, riscos, entre outras?

É interessante observar os diversos subproblemas que envolvem a solução do problema envolvendo dois caminhões, três cargas e quatro cidades; ou seja, sub-



alocações de recursos e sub-distribuições. Imagine agora o número de caminhões aumentando significativamente, bem como o de cidades, assim como o de cargas com diversos destinos diferentes. Quantos subproblemas não serão gerados com alta complexidade computacional?

Para solucionar problemas dessa natureza é que será proposto um modelo de AI nesse trabalho. Para que a alta complexidade, oriunda do enorme espaço de busca a se percorrer, bem como a grande quantidade de restrições de ordem prática que por ventura possam surgir, sejam tratados de forma razoável.

Soluções para esses problemas já existem e vêm sendo investigadas ao longo das três últimas décadas, como foi visto no capítulo anterior. Tais soluções têm uma forte base matemática. Muitas vezes, baseadas em técnicas como programação inteira e programação não linear. Os modelos de solução baseados nessas técnicas são muito rígidos, apesar de exatos e muitas vezes alcançarem a solução ótima. Porém, nem sempre admitem que restrições de toda e qualquer natureza sejam incluídas no modelo de uma hora para outra; e se são incluídas tais restrições e o problema continua a ser resolvido, nem sempre se garante a robustez do programa. Outras vezes, o que ocorre é que os algoritmos baseados nessas técnicas tendem a perder o desempenho quando as instâncias do problema crescem de forma modesta.

A partir do que foi exposto passou-se a pensar em formas alternativas de construção de algoritmos que permitissem a inclusão indiscriminada de restrições no modelo do problema, suportasse o crescimento da instância a ser resolvida e, além disso, tivesse um bom desempenho.

Algoritmos exatos, que realizem tal intento os pesquisadores já não têm esperança de alcançar. Resta então algoritmos aproximativos, heurísticos, inteligentes. Algoritmos aproximativos têm apresentado bons resultados, o que pode ser visto em [MIY97]. No entanto tais abordagens fogem a esse trabalho. Algoritmos heurísticos, como Busca Tabu [GLO89a], [GLO89b] tem tradição em apresentar boas soluções para problemas de otimização, mas também não fazem parte do escopo deste. O fato dessas duas abordagens não serem tratadas aqui não têm nenhuma justificativa, a não ser uma simples questão de opção, de escolha.

A proposta para o modelo de Agente que será apresentada é fortemente baseada em Colônias de Formigas. Antes, porém é interessante uma breve retrospectiva ao segundo capítulo, onde foram definidos os Agentes Inteligentes para que haja maior consistência em tudo.

De acordo com o que ficou ali exposto, um Agente, a partir de agora, para que seja o mais racional possível será definido como um software que, segundo [NOR95], é uma entidade que pode perceber seu ambiente através de sensores (ou sistemas de percepção) e atuar sobre ele por intermédio de seus mecanismos de atuação (ou sistemas de atuação, atuadores). Para isso dispõe de uma representação parcial desse ambiente, podendo, em um universo multi-agente (vários Agentes em comunidade), comunicar-se com outros Agentes. O comportamento global do agente ou da comunidade de Agentes é consequência de suas percepções e conhecimentos, bem como das interações realizadas. Além disso, pode-se dizer que o mesmo deve possuir:

- **Medida de Desempenho:** que define o grau de sucesso;

De modo geral o ideal é que, para cada seqüência possível de percepções, o Agente, independente da ação realizada, maximize sua **medida de desempenho** no ambiente em que esteja atuando.

Um outro aspecto que deve ser levado em consideração para obtenção do resultado acima é a **autonomia**. Pode-se dizer que um sistema é autônomo se seu comportamento é determinado pela sua própria experiência [NOR95].

Essas características, nesse trabalho, caracterizam um Agente.

Em linhas gerais a solução será composta de Agentes, cujo todo será chamado de AgeFor (Agente Formigueiro).

Para que possa ser amplamente entendida a proposta do AgeFor, inicialmente será apresentado como se organiza um formigueiro do ponto de vista biológico.

Segundo [GOR99]:

*“O mistério básico que cerca as colônias de formigas é que nelas não há administração. Uma organização ativa sem que haja alguém no comando é algo tão diverso do modo como os*

*seres humanos operam que chega a ser quase inconcebível. Não há nenhum controle central. Nenhum inseto dá ordens a outro ou o instrui a fazer coisas de determinada maneira. Nenhum indivíduo tem conhecimento do que deve ser feito para levar a cabo qualquer tarefa da colônia. Cada formiga abre seu caminho arranhando e picando através do minúsculo mundo de sua vizinhança imediata. As formigas se encontram, se separam, vão cuidar de seus afazeres. De certa maneira, esses pequenos eventos criam um padrão que engendra o comportamento coordenado das colônias". [Introdução, pág. 7]*

O texto apresentado de forma destacada foi extraído na íntegra da referência citada. Mostra, de forma sucinta, como se organiza uma colônia de formigas, ou um formigueiro. É importante notar que as formigas, apesar de organizadas, não trabalham como uma sociedade humana em miniatura; isso fica claro no texto. Dai surge a pergunta: como uma sociedade de criaturas tão insignificantes, a princípio, conseguem criar uma colônia que é eficaz?

## **4.2 A Sociedade das Formigas**

Segundo [GOR99] uma nova colônia se forma quando um macho de uma certa colônia se acasala com uma fêmea (rainha) de outra colônia. A partir daí, a rainha recém acasalada funda uma nova colônia. Usando apenas o sêmen desse acasalamento, essa rainha vai produzir todas as formigas que hão de compor a nova colônia. Sua fertilidade é impressionante, uma vez que ela deverá continuar produzindo formigas por 15 a 20 anos para manter a colônia ao longo de sua existência. O curioso é que o macho morre pouco tempo após o acasalamento, no máximo em três dias. Quando a rainha morre, a colônia não sai em busca de outra nem traz de volta uma de suas rainhas filhas. O que ocorre é que as operárias sobreviventes acabam morrendo, e então, sem ninguém para gerar outras operárias (função específica da rainha), o formigueiro como um todo acaba morrendo. Rainhas

recém acasaladas jamais vão para colônias já existentes, sempre fundam uma nova colônia, sua própria colônia.

A Rainha de um formigueiro tem um nome enganoso. Ao contrário do que se possa pensar, nada tem de régio. Seu trabalho é por ovos, não possuindo qualquer autoridade sobre as demais, ou forma de privilégios, como os reis ou autoridades humanas.

Segundo [GOR99] uma colônia se divide em dois grandes grupos: as que trabalham dentro do formigueiro, cuidando da rainha e da prole, empilhando alimento armazenado; e as operárias externas, que se deslocam entre o mundo fora da toca e as câmaras mais próximas da boca do formigueiro, sem descenderem às partes mais profundas do mesmo.

Vê-se em [GOR99], que as operárias começam seu labor logo no início da manhã. São elas que cuidam da manutenção, as patrulheiras, as operárias do monturo (lixo, dejetos) e as forrageadoras. As operárias da manutenção são as primeiras a iniciar o trabalho. Limpam a entrada do formigueiro removendo terra trazida pela água ou que foi usada para tapar a entrada da colônia ao final do dia de trabalho.

Logo depois é a vez das patrulheiras, que no início não são tão determinadas quanto as que fazem a manutenção. Inicialmente dão uma espiada fora da entrada do formigueiro, agarrando-se à borda com as patas dianteiras e agitando as antenas para todos os lados, na tentativa de verificar a paisagem química. De alguma forma, a partir de tal verificação elas escolhem as direções a serem tomadas no dia em questão pelas forrageadoras. Fato curioso, que [GOR99] descreve é que no início das verificações empreendidas pelas patrulheiras pode haver transações diplomáticas com as patrulheiras de outras colônias vizinhas para decidir qual colônia vai usar certo trecho de área forrageira.

No momento em que o patrulhamento chega ao seu auge, ou seja, quando as patrulheiras encontram-se bem dispersas pela área forrageira, entram em ação as forrageadoras. Elas saem da toca como se soubessem para onde ir, passam direto pelo murundu (porção de terra endurecida que cerca o formigueiro) e rumam para a vegetação circundante. O período de busca por alimentos pode durar várias horas. Quando a atividade atinge seu pico diário, as operárias da manutenção e as

patrulheiras já voltaram para dentro do formigueiro. Um outro grupo, o das operárias do monturo (lixeiros), sai com as patrulheiras. Essas operárias selecionam ou empilham refugos. Por vezes os monturos ficam cheios de cascas da semente mais encontrada durante a semana.

O pico da atividade forrageira ocorre quando o ar começa a ficar quente, tão quente que se consegue escutar o silêncio que ele gera. A forrageadoras se afobam, afastam-se por vezes 10m ou 20m do formigueiro. Quando chegam à área de busca da trilha reduzem sua marcha e exploram lentamente o solo com suas antenas. De modo geral, de acordo com as diversas condições a que está submetido o formigueiro, o número de forrageadoras que são enviadas para fora da colônia varia. O curioso é que essa variação tende a ocorrer em todos os formigueiros. Um dos elementos que influenciam a atividade forrageadora são as condições meteorológicas. No dia seguinte a uma tempestade, por exemplo, quando a inundação danificou as tocas, poucas formigas buscam alimentos e muitas fazem o trabalho de manutenção. Uma vez que os formigueiros foram reparados, as forrageadoras brotam entusiasmadamente, coletando sementes que estavam enterradas no solo e que foram descobertas pelo aguaceiro da tempestade.

### 4.3 A Procura por Alimento

A procura por alimento realizada pelas formigas leva em conta um aspecto muito importante de sua organização, ou seja, a resposta rápida a uma mudança nos recursos naturais. Segundo [GOR99], a espécie de formiga que tende a invadir nossas casas é uma bela ilustração desse fato. Uma minúscula migalha de bolo cai na bancada da cozinha e as formigas parecem estar lá numa questão de minutos. De fato, por toda parte existem formigas à espreita, o tempo todo, prontas para mobilizarem suas colegas de trabalho quando isso se faz necessário. Isso se dá da seguinte forma: as patrulheiras ficam mais tempo onde encontram alimentos, e as forrageiras só tomam trilhas que contêm um número mínimo de patrulheiras, dessa forma, uma trilha forrageira conduz a pelo menos um nível mínimo de abundância de alimento.

Um experimento curioso feito por [GOR99] consistia em espalhar comida para as formigas segundo determinada ordem, dessa forma elas eram levadas a constituir rotas de busca ótima para a procura de comida. No entanto, de um dia para outro, as patrulheiras não enviavam as forrageadoras para a melhor fonte de alimento da véspera. A partir daí pode-se concluir que as fontes que pareciam ser as melhores, do ponto de vista da pesquisadora, não tinham o mesmo valor segundo a avaliação das formigas. Este exemplo ilustra um problema básico de modelos de otimização. Do ponto de vista humano, as formigas forrageadoras deveriam maximizar a energia ganha, ou minimizar o tempo gasto trabalhando para adquirir energia. Porém, as formigas contrariaram as previsões da teoria de busca ótima por alimentos; ou ao menos aquilo que as pessoas entendem por ótimo. Por que será que isso ocorre? Será que as forrageadoras não são forrageadoras ótimas, ou os modelos de otimização, no que diz respeito ao que vem a ser a melhor fonte de alimentação para formigas está errado? Talvez o forragear que se observa, apesar de aparentemente contrariar o que se pensa ser ótimo, é na verdade o ideal; do ponto de vista da formiga. Pode ser que em determinado momento, para a formiga, o importante seja encontrar certa quantidade de determinado mineral bastante obscuro, encontrado somente na casca seca da semente de um capim raro. Tudo não passa de suposições. Não se pode saber, com certeza, se falta na visão humana algum elemento decisivo, no que diz respeito ao que é melhor para elas ou não.

Apesar do exposto acima, [GOR99] observa que o modo como as trilhas forrageiras mudam de um dia para outro provavelmente tem relação com a comida que as patrulheiras encontram em suas buscas no início da manhã. Mas se a disponibilidade de alimento tem um efeito forte sobre o local em que uma colônia forrageia, é difícil saber onde esse efeito se origina, porque a impressão que se tem é que mais ou menos a mesma comida está disponível por toda a área forrageira de uma colônia. Dessa forma, conclui [GOR99], a influência do alimento na atividade forrageira é um mistério. Disso tudo fica uma indagação. Já que as colônias possuem outras colônias como vizinhas, e é claro, ambas concorrem pelo mesmo alimento, como se dá tal concorrência? Ou ainda, existe diferença de comportamento de uma colônia mais jovem para uma mais velha?

## 4.4 Colônias Novas e Colônias mais Velhas

De acordo com biólogos, vê-se em [GOR99] que relações entre vizinhas afetam fortemente o local da busca do alimento. Colônias mais jovens são mais propensas que as mais velhas a tolerar vizinhas para conseguir comida. Ainda fazendo alusão ao depósito proposital de alimento citado acima, tanto as formigas de colônias mais velhas quanto aquelas pertencentes às colônias mais novas forrageavam em direção ao alimento depositado. Após o alimento ter sido retirado, todas as colônias, mais velhas ou mais novas, continuavam a forragear em direção ao suposto alimento. Porém, as colônias mais jovens insistiam por mais tempo. Essas continuaram na tentativa de forragear alimento inexistente, mesmo 6 dias após terem sido retirados. Os formigueiros mais velhos desistiam mais cedo. Uma vez tendo desaparecido a comida, mostravam-se inclinados a orientar seus esforços forrageiros noutra direção, em lugares diferentes.

## 4.5 Formigueiros Nebulosos

Gordon diz em [GOR99] que uma população de colônias de formigas é como uma floresta. Cada colônia, plantada numa vizinhança, usa suas forrageadoras para recolher os recursos de que necessita. Assim como os galhos de árvores vizinhas se emaranham em busca de luz, também as forrageadoras de colônias vizinhas partilham as sementes no solo. A floresta molda as árvores à medida que crescem, assim como a pressão exercida pelas vizinhas molda o comportamento de uma colônia de formigas. Para compreender como o comportamento das formigas evolui, precisa-se combinar desde as reações desajeitadas das operárias até as mudanças, ao longo de muitas gerações de formigas, nos modos como as colônias trabalham.

O paralelo feito acima explica, de certa forma, a conexão entre relações de vizinhança e a organização interna de uma colônia. A organização da colônia determina quando as formigas forrageiam, e quantas o fazem. A quantidade de atividade forrageira que uma colônia pode realizar determina suas chances de se reproduzir. Qualquer comportamento que reduza a possibilidade de uma colônia de estar entre as poucas que reproduzem poderia, se fosse possível, ser selecionado.

Isso leva a uma questão sobre a organização interna de uma colônia: O que determina, o forragear de uma colônia? Do ponto de vista da quantidade?

Para tentar responder tal pergunta pode-se partir do princípio que forragear é uma atividade que está intimamente ligada com a organização interna do formigueiro. Tal organização surge dos modos como os indivíduos reagem a seu ambiente e das suas interações com os outros. Essa interação, que nada mais representa que um contexto social, segundo [GOR99] e [BTD98]; poderia ser visto como respostas dadas pelas formigas a estímulos químicos. A maioria das formigas tem uma visão muito deficiente. Percebem o mundo, bem como umas às outras através de odores principalmente. As formigas têm grande número de glândulas, até 14, e cada uma secreta uma substância química diferente. Algumas se espalham no ar, outras são absorvidas pelo solo, ou ficam depositadas nos troncos das árvores, ou em qualquer superfície que a formiga caminhe. As formigas percebem essas substâncias químicas com suas antenas. Em algumas espécies, formigas que encontram uma fonte de alimento deixam uma trilha química no solo quando retornam ao formigueiro. Outras formigas no formigueiro podem seguir essa trilha para retornar à comida.

Ainda segundo [GOR99], nos primórdios da pesquisa sobre comunicação química entre formigas, tinha-se esperança de que seria possível explicar o comportamento delas descobrindo os feromônios a que cada espécie de formiga responderia e catalogando as respostas de cada uma a cada substância química. Mas não há nenhuma correspondência biunívoca entre uma substância química e uma resposta. Assim como uma mesma palavra pode ter significados diferentes em diferentes situações (pense nos muitos tons e sentidos com que alguém poderia dizer as palavras “mãe” ou “sim”), assim também a mesma pista química pode evocar respostas diferentes em situações sociais diferentes.

Em resumo, a resposta a um estímulo químico varia, dependendo do que a formiga esteja fazendo.

Do que acima foi mostrado, principalmente nos dois últimos parágrafos pode-se concluir que a resposta de uma formiga a determinado estímulo químico possui um comportamento nebuloso, dependendo não só da situação em que ela se encontra, mas também da intensidade desse estímulo.



## 4.6 Ação sem Comando

O que leva uma formiga a sair para executar uma tarefa em determinado momento? Essa pergunta, feita em [GOR99], leva a um comportamento muito interessante, original e diferente; se comparado com as sociedades humanas. Como ninguém diz às formigas o que fazer, o comportamento de cada uma delas depende de interações muito locais com outras formigas e com o mundo tal como uma formiga o percebe [GOR99].

A experiência de uma formiga é, sobretudo química e tátil. Ela só tem conhecimento do que suas antenas atingem. Movimenta-se de um lado para o outro para se ajustar ao mundo. Encontram-se umas com as outras. Coisas lhes acontecem e a partir de tudo isso tomam suas decisões. O mais interessante é que de algum modo tudo isso se aglutina no comportamento da colônia. Deve haver regras que relacionam a experiência de uma formiga com sua ação subsequente, regras como: quando encontrar comida, recolha-a; quando encontrar perigo, rode em círculos e emita o odor de alarme. O comportamento da colônia é previsível, o que significa que a experiência das formigas deve ter alguma regularidade. Se uma colônia forrageia todos os dias, as condições que evocam esse comportamento devem ocorrer todos os dias [GOR99].

## 4.7 A Gestão do Formigueiro

Se as condições no formigueiro mudam, incluindo aí toda a sua área de abrangência, as formigas trocam de tarefas. Segundo [GOR99] se um alimento imprevisto aparece, uma formiga que estava trabalhando com o monturo vai trocar de tarefa e se tornar forrageadora. Essa versatilidade mostra um dos pontos-chaves da gestão bem sucedida do formigueiro.

Pode-se dizer que, do ponto de vista do formigueiro, a alocação de tarefas é o processo que resulta no engajamento de certas operárias em tarefas específicas, em números apropriados à situação do momento.

Sobre esse aspecto vê-se em [GOR99] que a alocação de tarefas é uma solução para um problema dinâmico, sendo, portanto um processo de ajustamento

contínuo. Opera sem nenhum controle central ou hierárquico para designar formigas individuais para tarefas particulares. A rainha, como já foi dito, não é uma figura de autoridade; não tem nenhuma relação com os sistemas políticos humanos. Não decide que operária faz o quê. É uma colônia de médio porte; metros de túneis, câmaras intrincadas e milhares de formigas separam a rainha, rodeada por operárias internas, das formigas que trabalham fora do formigueiro e usam apenas câmaras próximas da superfície. Seria fisicamente impossível para a rainha orientar a decisão de cada operária acerca de que tarefa desempenhar e quando. A ausência de controle central pode parecer ilógica, uma vez que o comum é a existência de grupos sociais hierarquicamente organizados em muitas esferas das sociedades humanas, incluindo as universidades, empresas, governos, etc.

Nenhuma formiga é capaz de avaliar as necessidades globais da colônia, ou de contar quantas operárias estão engajadas em cada tarefa e decidir quantas deveriam ser remanejadas. As capacidades dos indivíduos são limitadas. Cada operária só precisa tomar decisões razoavelmente simples. Há indícios abundantes, por todo o campo da física, das ciências sociais e da biologia, de que esses comportamentos simples de indivíduos podem levar a padrões previsíveis no comportamento de grupos. Pode-se dizer que, a execução de tarefas diferentes não é independente e que o comportamento de um grupo de formigas, ainda que pequeno, influencia o de outro [GOR99].

Um aspecto importante da gestão é que também pode ser visto em [GOR99] é que a medida que a colônia envelhece seu sistema de gestão muda. Não só do ponto de vista da alocação de tarefas, mas também em relação a interação com o mundo a sua volta. Em resumo a gestão de um formigueiro mais velho é mais "inteligente" que um mais novo.

## 4.8 Formigueiro como um Sistema Complexo

A dinâmica da vida de uma colônia de formigas tem alguns traços em comum com a de muitos sistemas complexos. Um deles, importante de ser ressaltado é que unidades bastante simples – formigas – geram um comportamento global complexo.

A questão intrigante acerca da alocação de tarefas é: como podem as formigas reagir a eventos locais de maneiras simples que, no conjunto, produzem o comportamento da colônia? Questões do mesmo tipo surgem, reiteradamente, por toda a biologia: Como os neurônios reagem uns aos outros de maneira a produzir pensamentos? Como as células reagem umas às outras de uma maneira que produz os diferentes tecidos de um embrião em desenvolvimento? Como as espécies interagem para produzir mudanças previsíveis, ao longo do tempo, em comunidades ecológicas [GOR99]?

A partir de tudo isso é possível dizer que um formigueiro, ao contrário do que parece, é um ente bastante difícil de ser entendido. Mais que isso, fornece um exemplo de uma bem sucedida comunidade que se comporta de maneira inteligente em busca da solução de seus próprios problemas.

Uma lição que as formigas dão é que para compreender um sistema como o delas não é suficiente desagregá-lo. O comportamento de cada unidade não está encerrado dentro daquela unidade, mas decorre de suas conexões com o resto do sistema. Para ver como os componentes produzem a resposta do sistema global, deve-se rastrear essas conexões em situações cambiantes. Pode-se dissecar um cérebro em milhões de diferentes células nervosas, mas jamais irá se encontrar alguma dedicada a pensar sobre a "natureza" ou as "formigas" ou qualquer outra coisa; os pensamentos são feitos pelo padrão em mudança de interações de neurônios. Os anticorpos se formam no sistema imune como consequência de encontros com células estranhas. As formigas não nascem para executar certa tarefa; a função de cada uma delas muda juntamente com as condições que encontra, incluindo as atividades de outras formigas [GOR99]. Mais que isso, ao executarem determinada tarefa, uma não diz a outra o que fazer por meio da transferência de mensagens. O sinal não está no contato, ou na informação química trocada no contato. O sinal está no padrão do contato [GOR99].

Com isso chega ao fim a descrição, do ponto de vista biológico, de como se organiza uma sociedade de formigas. Muitas coisas ficam por dizer, mas o que mais vem de encontro à proposta desse trabalho foi tratado. Dessa forma espera-se iniciar uma abertura para o desenvolvimento do AgeFor e também justificar a escolha de sociedades de formigas para compor tal modelo. O próximo passo será

a apresentação de uma brilhante análise, agora cognitiva, proposta por Douglas R. Hofstadter [HOF00] de como se comporta e se organiza um formigueiro.

## 4.9 O Formigueiro Complexo e Inteligente

Uma vez que esse trabalho usa a metáfora da cooperação existente entre as formigas e, por conseguinte, a inteligência coletiva como sua âncora, nada mais razoável que a busca de conceitos que descrevam o funcionamento do formigueiro, que possa não só traduzi-lo tal qual ele é (ou pensa-se que é), como também permitir a modelagem de sistemas inteligentes para fins de solução de problemas difíceis. De certa forma, isso já foi feito anteriormente, do ponto de vista biológico. Agora será mostrada uma descrição cognitiva. As idéias que se seguem foram extraídas de [HOF00], bem como a inspiração do texto. Na verdade, o que se apresenta abaixo é uma versão reescrita em modo corrente dos diálogos presentes em [HOF00].

Inicialmente se tentará dar uma definição do que vem a ser um formigueiro. É claro que não serve dizer que o mesmo é um buraco ou toca de formigas, ou que é uma colônia de formigas que vivem nesse buraco, ou ainda, que é uma grande porção de formigas; tal como muitos dicionários apresentam; vez que não se tem, a partir daí, uma idéia clara de como o mesmo trabalha, se organiza, busca alimentos e materiais para se constituir.

Para iniciar essa tentativa de compreensão, inicialmente pode-se arriscar descrevê-lo de forma reducionista. O conceito de reducionismo apresentado em [MIC98] fala em *“tendência em reduzir fatos ou situações de um plano mais complexo a outro mais simples”*; em outras palavras pode-se definir reducionismo como descrever, ou compreender algo a partir da soma das partes, o que inclui também conhecer a natureza dessa soma. A partir daí é natural que surja a seguinte questão. Pode um formigueiro ser compreendido de forma reducionista? Uma resposta seria sim, pois basta compreender as partes (formigas) para, em função de uma junção, compreender-se o todo (formigueiro). Outra resposta seria não, uma vez que, o comportamento de um formigueiro, no que diz respeito a sua “inteligência

coletiva”, pode, ainda que de forma rudimentar, bastante simplificada, ser comparada a um cérebro. O cérebro, em hipótese alguma pode ser explicado, ou entendido de forma reducionista. Qualquer explicação nesse sentido deixará, inevitavelmente, de explicar a origem da consciência experimentada por um cérebro.

Se falha a explicação reducionista pode-se tentar uma holística. Holismo, segundo [MIC98] *“é uma doutrina que considera o organismo vivo como um todo indecomponível; ou ainda, uma compreensão da realidade em totalidades integradas onde cada elemento de um campo considerado reflete e contém todas as dimensões do campo, evidenciando que a parte está no todo, assim como o todo está na parte, numa inter-relação constante, dinâmica e paradoxal”*. Do ponto de vista do formigueiro, explica-lo dessa forma é curioso, pois se pode perguntar como uma descrição holística de um formigueiro pode descrevê-lo mais que a descrição interna de suas formigas, funções e inter-relações? Qualquer descrição holista de um formigueiro deixará, inevitavelmente, de explicar a origem da consciência de um formigueiro.

As argumentações e contra-argumentações acima tentam mostrar que, a primeira vista, pode ser simples tentar explicar, conceituar, descrever um formigueiro; mas na verdade não é tão simples assim. Na realidade, o contexto é tão amplo que tanto as explicações holísticas quanto as reducionistas se encaixam como uma unidade inseparável.

Segundo [HOF00], um formigueiro, visto como um todo, é uma unidade bem definida, com suas próprias qualidades, que às vezes até incluem o domínio da linguagem. Mostra no texto, que os mesmos conversam internamente através da “escrita”. As trilhas formadas pelas formigas contêm informações de forma codificada. Toda essa estrutura interna sofre a influencia externa do Tamanduá, que é uma espécie de “cirurgião” de formigueiros. Corrige desordens nervosas pela técnica da remoção cirúrgica, ou em linguagem mais coloquial, come as formigas que se tornam desnecessárias na coletividade, promovendo, com isso, a integridade, a estabilidade do formigueiro. Daí, mais uma vez, ressalta-se a complexidade da descrição do que vem a ser um formigueiro, bem como a impossibilidade de aplicação dos conceitos reducionista e holistas em separado; de forma desconexa.

As formigas são bastante parvas. Não “conversam”. A inteligência está no formigueiro, ou seja, na coletividade. É uma situação semelhante à composição de um cérebro humano a partir de neurônios. Uma célula cerebral, por si, não é inteligente.

Ao contrário do que se pensa, formigas não são entes que perambulam de modo completamente aleatório, deparando, de vez em quando, com um pedaço de comida. Não são livres para fazer o que quiser. Sua liberdade está circunscrita dentro de certos limites. Por exemplo, são livres para vagar, para escovarem-se umas às outras, para apanhar coisas pequenas, para trabalhar nas trilhas, etc. No entanto, nunca saem do pequeno mundo, do sistema em que vivem. Isso ocorre porque não têm mentalidade necessária para imaginar qualquer coisa. Sendo assim, formigas são componentes muito confiáveis, na medida em que se pode depender delas para a execução de certos tipos de tarefas.

Apesar de parecer que, mesmo dentro de certos limites de liberdade elas se comportam de forma aleatória, perambulando incoerentemente, sem qualquer noção dos mecanismos de pensamento de um ser de nível mais alto; existe, não obstante, tendências gerais que envolvem grandes números de formigas, que podem emergir de todo esse caos. De fato, as trilhas de formigas são um exemplo perfeito de tal fenômeno. Se tomadas individualmente, as formigas mostram um comportamento bastante imprevisível em suas trilhas. No entanto a trilha permanece bastante definida e estável. O que mostra que elas, na verdade não estão apenas perambulando aleatoriamente. Em outros termos, existe algum grau de comunicação entre as formigas, o suficiente para não permitir que fiquem vagueando completamente, sem rumo. Por meio dessa comunicação mínima, elas podem lembrar-se de que não estão sozinhas, mas sim em cooperação com colegas de equipe. É preciso que haja um grande número de formigas, cada uma apoiando a outra desse jeito, para que seja mantida qualquer atividade, como, por exemplo, a construção de trilhas. Fazendo um paralelo com o nosso cérebro, tem-se que algo semelhante ocorre com o acionamento dos neurônios. Nesse caso é necessário que um grupo de neurônios seja acionado para que se dê o acionamento de outro neurônio; ou seja, cada neurônio recebe sinais de neurônios conectados às suas linhas de entrada, e se o total da soma de entradas exceder, em qualquer momento,

um limite crítico, aquele neurônio será acionado e enviará sua descarga a outros neurônios que, por sua vez, serão acionados e assim por diante. Esse processo dar-se-á até que alguma mensagem sensorial interfira no processo.

Em função do paralelo acima fica mais natural a compreensão, no caso das formigas, de que um grupo de fenômenos que possua coerência, por exemplo a construção de trilhas, ocorrerá somente quando estiver envolvido um certo número limite de formigas. Caso um esforço seja iniciado, talvez aleatoriamente por poucas formigas em algum lugar, poderá ocorrer uma das duas coisas a seguir:

- Malogrará, após um breve e confuso início quando não houver um número suficiente de formigas para manter o processo em andamento;
- Agregar-se-á ao processo uma quantidade crítica de formigas e o mesmo terá o efeito de uma bola de neve, integrando mais e mais formigas. Desse jeito, um “time” inteiro toma forma e trabalha em um único projeto. Tal projeto pode consistir em fazer trilhas, buscar alimentos ou envolver a manutenção dos ninhos.

Apesar da extrema simplicidade desse esquema, em escala pequena, ele poderá deflagrar conseqüências bastante complexas, em escala maior.

Para que seja bem assimilada essa idéia da ordem emergente do caos conforme já assinalado é necessário que se compreenda a organização do formigueiro a partir de diversas camadas estruturais. Em tal sociedade existem várias espécies deferentes de formigas, as chamadas “castas”. Fora a rainha, há os machos, que em nada contribuem para a manutenção dos ninhos e os soldados. As tarefas existem aos montes e devem ser desempenhadas. As formigas individuais desenvolvem especializações. Geralmente essas especializações se modificam com o envelhecimento da formiga. Depende também da casta da formiga. A qualquer momento, em qualquer área pequena de um formigueiro, há formigas de todos os tipos. Sem dúvida, uma casta pode ser muito esparsa em alguns lugares e muito densa em outros. Essa distribuição de castas é bastante delicada e desenvolve-se

ao longo de um grande período de tempo. Isso se dá em função da constância do movimento para lá e para cá das formigas dentro do formigueiro, o que também adapta a distribuição de castas a situações variáveis. Assim, a distribuição de castas não permanece com um único padrão rígido, isto é, ela é constantemente modificada, de modo a refletir, de alguma maneira, a situação de mundo real com a qual o formigueiro está lidando, e é precisamente o movimento dentro do formigueiro que atualiza a distribuição de castas, de modo a mantê-la de acordo com as circunstâncias atuais que se apresentam no formigueiro.

Quando o tamanduá se aproxima do formigueiro, todas as formigas, ao perceberem seu odor, entram em pânico, o que significa que começam a correr de forma completamente diferente da anterior à sua chegada. Ou seja, a ação das formigas, em resposta à chegada do tamanduá muda completamente a distribuição de castas do formigueiro. Essa redistribuição é uma espécie de mudança de estado, uma atualização. É um acréscimo de uma "porção de conhecimento" ao formigueiro. Tal estado de coisas pode sugerir a seguinte questão: como uma simples redistribuição dos diferentes tipos de formigas dentro de um formigueiro pode ser vista como uma "porção de conhecimento" ?

Para que isso fique claro é necessário observar que tudo se resume em como é feita a escolha da descrição da distribuição de castas. Pensando em termos de níveis mais baixos, as formigas, pode haver uma mistura, uma confusão de conceitos. Algo como se confundir a floresta com as árvores. Florestas são florestas e árvores são árvores. Apesar da primeira ser composta da segunda, isso não as torna iguais. Caso se resolva conhecer uma floresta analisando umas poucas árvores, suas componentes, muitos detalhes de nível macro serão desprezados. No caso do formigueiro, formigas são um nível demasiado microscópico, e quando se pensa microscopicamente, a tendência é perder-se algumas características de grande escala. É necessário encontrar o arcabouço de alto nível apropriado para a descrição da distribuição de castas, dessa forma, haverá sentido na maneira que a distribuição de castas codifica muitos pedaços de conhecimento. Para se encontrar as unidades de tamanho apropriado para descrever o estado atual do formigueiro começa-se pelo nível mais baixo. Quando há necessidade de que algo seja feito, as formigas formam pequenos "times", que permanecem unidos durante o desempenho



de uma tarefa. Como mencionado antes, formam-se e desmancham-se constantemente pequenos grupos de formigas. Os que existem durante algum tempo são os times, e a razão pela qual não se desfazem é porque há, realmente, algo para fazerem; o que é equivalente dizer que não se desfazem porque o seu tamanho excedeu um certo limite. Como exemplo, tem-se que, na busca de alimentos, se uma quantidade irrelevante de comida em alguma parte é descoberta por uma formiga em suas andanças, que procura então comunicar seu entusiasmo às outras, o número de formigas que responderá será proporcional à quantidade do achado, uma vez que uma quantidade irrelevante não atrairá um número de formigas suficiente para ultrapassar o limite.

Os "times" mencionados acima se posicionam nos níveis intermediários da estrutura, entre o nível da formiga individual e o do formigueiro. Além disso, existe um tipo especial de time chamado de "sinal"; dessa forma todos os níveis mais altos da estrutura são baseados em sinais. Conseqüentemente pode-se ver todas as entidades mais altas como coleções de sinais que atuam em conjunto. Existem também times de nível mais alto cujos membros não são formigas, mas times de níveis mais baixos. Dessa forma pode-se enxergar, ou alcançar os times de nível mais baixo, ou seja, os sinais; e abaixo deles as formigas.

O nome sinal é bastante sugestivo para esse grupamento de formigas, e deriva de sua função. O efeito dos sinais é transportar formigas de várias especializações para partes apropriadas do formigueiro. Dessa forma, um sinal passa a existir ao ser ultrapassado o limite necessário para a sobrevivência; então migra através do formigueiro e, em algum ponto do mesmo, vai-se desintegrando em seus membros individuais e deixa-os à sua sorte.

Para uma melhor compreensão, pode-se fazer uma análise comparativa com o efeito de uma onda do mar, que traz consigo estrelas marinhas, algas, dentre outras coisas, e deixa-as espalhadas, encalhadas na praia. De forma análoga, os times depositam algo que trouxeram consigo de um lugar distante, porém, enquanto a água da onda retorna ao mar, não há uma substância transportadora análoga no caso de um sinal, já que são as próprias formigas o compõem.

Uma outra maneira de ver essas idéias é a seguinte: uma vez formado o sinal, não há consciência, de sua parte, de que deve se dirigir a alguma direção

particular. No entanto, a delicada distribuição de castas tem um papel crucial. É ela que determina o movimento dos sinais através do formigueiro, como também quanto tempo um sinal permanecerá estável e quando se “dissolverá”. Vê-se com isso, que tudo depende da distribuição de castas. Como exemplo, pode-se imaginar que um sinal esteja em movimento. Ao seguirem seu caminho, as formigas que o compõem interagem, ou por contato direto, ou por intercâmbio de odores, com as formigas das vizinhanças por onde passam. Os contatos e os odores fornecem informações sobre as questões locais de urgência, tais como construção de ninhos, cuidados com infantes, ou o que quer que seja. O sinal permanecerá integrado contanto que as necessidades locais sejam diferentes do que ele pode suprir; mas, se puder contribuir, desintegrar-se-á, expedido um time novo de formigas úteis no local. Dessa forma a distribuição de castas atua como guia geral dos times dentro do formigueiro.

É interessante observar o exposto acima a partir de dois pontos de vista. Do ponto de vista da formiga o sinal não tem propósito, isto é, não é intencional. A formiga típica em um sinal apenas serpenteia em volta do formigueiro, em busca de nada em particular, até que acha que sente vontade de parar. Seus companheiros de time concordam, em geral, e naquele momento o time se descarrega por meio da desintegração, deixando apenas seus membros, mas nada de sua coerência. Nenhum planejamento é requerido para determinar a direção apropriada. Não obstante, do ponto de vista do formigueiro, o time acabara de responder a uma mensagem que fora escrita na linguagem da distribuição de castas; sendo assim, dessa perspectiva existe intencionalidade na atividade recém executada.

Depois do que se viu até aqui, uma pergunta fica no ar: O que aconteceria, caso a distribuição de castas fosse feita de forma inteiramente aleatória? Resposta: o formigueiro não duraria muito uma vez que esse tipo de distribuição carece de significado. Os formigueiros sobrevivem, porque a sua distribuição de castas possui um significado, e esse significado é um aspecto holista, invisível nos níveis mais baixos. Perde-se poder explanatório e de compreensão, caso tais níveis mais altos não sejam levados em consideração. Não obstante a tudo isso, o mais belo é que esse significado é fruto de um rigoroso processo de evolução a que foi submetido o formigueiro durante bilhões de anos. Durante esse tempo, uns poucos mecanismos

foram selecionados e muitos foram rejeitados. O que resultou em um conjunto de estruturas que faz os formigueiros funcionarem da forma descrita. Em outras palavras e de forma categórica, o formigueiro, tal qual se apresenta, é única e exclusivamente fruto da evolução, não interessando como se comportam seus mecanismos internos de funcionamento. Porém, ao se deixar de lado a evolução vê-se o significado da distribuição de castas e a intencionalidade dos sinais.

Um observação interessante a respeito dos sinais que teve origem com a evolução é o fato de dois ou mais poderem passar uns através dos outros, sem que se percebam mutuamente, cada um lidando com o outro como se fosse parte da população de fundo local.

Um sinal, desde sua criação até a sua dissolução nem sempre consiste do mesmo conjunto de formigas. Com o passar do tempo, algumas se desligam e são substituídas por outras da mesma casta, se existirem nas imediações, de modo que os sinais chegam a seus pontos de desintegração sem nenhuma das formigas que o compuseram inicialmente.

Até agora, a descrição do que vem a ser um formigueiro, prima por uma distribuição de castas que não é bem visualizada em termos de formigas e de sinais, mas sim em termos de times, cujos membros são outros times, que são membros de outros times, e assim por diante, até que se chega ao nível da formiga. A partir daí, com o objetivo de melhorar a descrição do formigueiro, dar-se-á, aos times de um nível suficientemente alto o nome de símbolos; onde por símbolos, entendem-se "sub-sistemas ativos" de um sistema complexo e são compostos de subsistemas ativos de nível mais baixo; o que os diferencia bastante dos símbolos usuais que são passivos, externos ao sistema, como as letras do alfabeto, ou as notas musicais, que permanecem imóveis, aguardando que um sistema ativo as processe.

Apesar de parecer confuso, todas essas camadas são necessárias para a armazenagem dos tipos de conhecimento que permitem um organismo ser "inteligente", em qualquer sentido razoável da palavra. Qualquer sistema que tenha domínio da linguagem possui, essencialmente, os mesmos conjuntos subjacentes de níveis.

Aos times de nível mais baixo dar-se-á o nome de sinais. A diferença entre símbolos e sinais é a mesma entre palavras e letras; um possui naturalmente

significado, o outro só possui significado em conjunto. No entanto, é necessário ter claro que palavras e letras são passivas, e os símbolos e sinais são ativos.

Na tentativa de dar maior clareza às idéias propostas (extraídas de [HOF00]) até então, pode-se pensar na diferença funcional entre um símbolo e um sinal. Essa diferença seria mais ou menos como a existente entre palavras e letras. As palavras, que são entidades condutoras de significado, são compostas de letras, as quais, em si, não conduzem qualquer significado. Isso dá uma boa idéia da diferença entre símbolos e sinais.

A importância dessa ênfase encontra-se no fato de que o significado que se atribui a qualquer símbolo passivo, como uma palavra em uma página, deriva, na realidade, do significado que é conduzido pelos símbolos ativos correspondentes no cérebro. De modo que o significado dos símbolos passivos só pode ser compreendido de forma apropriada quando relacionado ao significado dos símbolos ativos. Em resumo o significado que envolve um símbolo ativo tem a ver com a maneira como os símbolos podem causar o acionamento de outros símbolos. Quando um símbolo se torna ativo, não o faz isoladamente. Faz porque paira em um meio que é caracterizado por sua distribuição de castas. Se fosse feito um paralelo com o cérebro, não há, obviamente algo como uma distribuição de castas, mas ainda assim existe uma contrapartida, que se chama "estado cerebral". Nesse estado, são descritos os estados de todos os neurônios, todas as interconexões, e o limite para o acionamento de cada neurônio.

O estado referido acima pode ser descrito em nível alto ou baixo. Uma descrição de nível baixo do estado de um formigueiro envolveria a penosa especificação da localização de cada formiga, de sua idade e casta, bem como outros itens similares. Seria uma descrição extremamente detalhada, que não produziria quase nenhuma compreensão do porquê daquele estado. Por outro lado, uma descrição de nível alto envolveria a especificação de quais símbolos poderiam ser acionados por quais combinações de outros símbolos, sob que condições, e assim por diante. A descrição em nível alto parece possuir poder de maior explicação, na medida em que dá um quadro mais intuitivo do formigueiro. O curioso é que tal descrição deixa de lado a característica que parece mais importante para o formigueiro, que são as formigas. Diz-se parece, porque as formigas, na realidade,

não são a característica mais importante. É claro que se não fossem elas o formigueiro não existiria, mas pode-se pensar nisso fazendo ainda o paralelo com o cérebro. O mais importante não é os neurônios.

Existe ainda outro nível de descrição do estado, que seria um nível médio. Englobaria uma descrição em nível de sinais ou dos times. Tal descrição conteria uma grande quantidade de informações sobre o que está realmente acontecendo em locais específicos por todo o formigueiro, embora certamente menos que uma descrição de formiga por formiga, uma vez que os times consistem em amontoados de formigas. Uma descrição time por time, é como uma descrição formiga por formiga. Contudo, tem-se que adicionar algumas coisas extras que não estavam presentes na descrição de formiga por formiga; tais como as relações entre os times e o suprimento de várias castas aqui e acolá. Essa complicação adicional é o preço que se paga pelo direito de resumir.

Parece contra-intuitivo tal descrição, pois sugerem a idéia de que para apreender toda a estrutura, necessário se faz descrevê-la omitindo qualquer menção aos seus blocos de construção fundamentais. No entanto, é exatamente essa a idéia. Para que isso seja bem compreendido, basta fazer uma analogia com a leitura de um livro. Quando alguém lê um romance, não perde tempo lendo letra por letra de cada palavra, tentando extrair o significado de seu conceito. Por exemplo, a palavra "sua", de forma alguma é lida levando-se em consideração o conceito presente em "s", em "u", e em "a". Isso é um tanto cansativo e desprovido de sentido, uma vez que, cada vez que aparecesse uma letra, deveria dar-se atenção ao seu conceito específico e não ao contexto dela na palavra, da palavra na frase e da frase no texto. Ao contrário do exposto, a leitura de um romance é feita levando-se em consideração o nível mais alto, ou seja, o enredo, as personagens, e assim por diante.

Com o que foi dito acima é de se esperar que tenha ficado claro como os "pensamentos de um formigueiro" emergem da manipulação de símbolos compostos de sinais compostos de times compostos de times de nível mais baixo, e assim por diante, até chegar-se às formigas. Faltam agora dois últimos esclarecimentos. O primeiro é referente a quem faz a "manipulação desses símbolos", uma vez que eles são por si só ativos. Em outras palavras, quem é o agente? O segundo refere-se a

como se comporta o formigueiro caso o mesmo sofra algum acidente como uma inundação, destruição, ou qualquer outro tipo de desagregação.

Primeiramente, quem faz a manipulação dos símbolos? Para que tal pergunta seja respondida, necessário se faz observar o fato de que os símbolos, por si só, são ativos, mas as atividades que eles executam não são, entretanto, absolutamente livres. As atividades de todos os símbolos são estritamente determinadas pelo estado do sistema inteiro em que residem. Portanto, o sistema inteiro é responsável por como seus símbolos se acionam uns aos outros, e assim é bastante razoável falar do sistema inteiro como o "agente". À medida que os símbolos operam, o estado do sistema é transformado lentamente, ou atualizado. Mas há muitas características que permanecem por mais tempo. Esse sistema parcialmente constante, parcialmente variável, é o agente. Ou seja, é o formigueiro quem manipula seus próprios símbolos. Tal como ocorre com as pessoas. Os seres humanos têm consciência de seus próprios pensamentos. Têm consciência das coisas. Podem ler o próprio cérebro diretamente, no nível dos símbolos. As pessoas contornam os níveis mais baixos e só percebem o nível mais alto. Mais que isso, em qualquer sistema consciente, há símbolos que representam o estado cerebral, e eles são, por si, parte do próprio estado cerebral que simbolizam; uma vez que a consciência requer um grande grau de autoconsciência.

Segundo, o que ocorreria com o formigueiro caso o mesmo sofresse uma grande desordem, um grande acidente? Por exemplo, um lindo dia de sol, em pleno verão, cai uma grande tempestade fora do normal. Coisa bem comum de acontecer em verões. Tal volume de água pode, com certeza, encharcar por completo o formigueiro. Uma vez que ela chegaria sem avisar, as formigas ficariam completamente confusas e desorientadas. Dessa forma, a organização poderia ir toda por água abaixo em pouco tempo. No entanto, isso não quer dizer que as formigas se afogariam. As formigas sobreviveriam, cada uma delas desesperada subindo por galhos e gravetos. O que causaria a destruição do formigueiro seria, em virtude do espalhamento das formigas, uma completa desorganização na estrutura de casta, isto é, a distribuição de casta seria completamente destruída. As próprias formigas não conseguiriam reconstruir o que fora antes uma organização tão

perfeita. Em resumo a organização desintegrar-se-ia além da possibilidade de reconstituição.

Não obstante a possibilidade de catástrofe mostrada acima, como a natureza é perfeita, não seria surpresa se, nos meses seguintes, as formigas comessem a se re-agrupar, em uma nova organização, que seria composta das mesmas formigas inicialmente, mas com uma distribuição de castas completamente diferente da anterior. Que coisa! Tem-se então, um formigueiro adaptativo. Ou, não seria melhor dizer, um agente adaptativo?

A partir do que foi mostrado, que nunca é demais lembrar, foi extraído de [HOF00] e reescrito a partir de seus diálogos; observa-se que uma organização de formigas é muito mais que uma simples agremiação de insetos que buscam sua sobrevivência. Está perfeitamente claro que, apesar de uma simples formiguinha não possuir a menor importância, se comparada com o todo, o formigueiro tem um comportamento altamente organizado, autônomo, orientado a metas; tais metas são postas e revistas segundo aquilo que ocorre em seu interior e em seu exterior, segundo seu relacionamento com os vizinhos, segundo fatos imprevistos que ocorrem; em suma ele é um excelente exemplo de como o coletivo, a partir do burro individual, pode ser inteligente.

A partir de agora serão mostrados alguns grifos, partes do texto já exposto, e que foram marcados devido a sua importância em relação ao modelo que em breve será descrito.

Quando [GOR99] se refere às formigas: "agitando as antenas para todos os lados, na tentativa de verificar a paisagem química" pode-se dizer que esse comportamento expressa nada mais que um mecanismo de percepção que o agente formiga possui. Outro fato curioso é: Elas saem da toca como se soubessem para onde ir. Observe que Gordom faz essa colocação, depois de afirmar que existem as patrulheiras que fazem uma verificação a priori, do ambiente externo ao formigueiro. Pode-se também concluir que, do ponto de vista do formigueiro, as patrulheiras funcionam como o mecanismo de percepção (do agente) para encontrar alimentos. Outra colocação interessante: A procura de alimento realizada pelas formigas leva em conta um aspecto muito importante de sua organização, ou seja, a resposta rápida a uma mudança nos recursos naturais. Tal colocação vem diretamente ao

encontro da idéia de auto-organização. Tal propriedade consiste no anseio de muitos agentes de software. Fato ainda digno de menção: as patrulheiras ficam mais tempo onde encontram alimentos, e as forrageiras só tomam trilhas que contêm um número mínimo de patrulheiras, dessa forma, uma trilha forrageira conduz a pelo menos um nível mínimo de abundância de alimento. É patente o comportamento inteligente expresso nessa colocação, podendo-se perfeitamente concluir que há uma busca da minimização de energia para se achar comida e uma tentativa de maximizar o alimento a ser encontrado.

Ainda dentro das idéias expostas acima, um outro ponto digno de atenção é: Após ter sido retirado o alimento todas as colônias, mais velhas ou mais novas forrageavam em direção ao suposto alimento. Porém, as colônias mais jovens insistiam por mais tempo. Essas continuaram na tentativa de forragear alimento inexistente, mesmo 6 dias após terem sido retirados. Os formigueiros mais velhos desistiam mais cedo. Observa-se aí um comportamento de aprendizado, onde as formigas mais velhas não insistem, tanto quanto as mais novas, em situações que a nada levam.

Dizer que a organização do formigueiro está ligada ao que está exposto na frase seguinte: Tal organização surge dos modos como os indivíduos reagem a seu ambiente e das suas interações com os outros. Também sugere o aprendizado constante e auto-organização.

Um aspecto nebuloso é o que a seguinte colocação mostra: Em resumo, a resposta a um estímulo químico varia, dependendo do que a formiga esteja fazendo. Conclui-se daí que não basta um estímulo para que a formiga resolva tomar determinada atitude. Tal estímulo deve ultrapassar a um limiar qualquer que varia de situação para situação.

Qualquer coisa que lembre um sistema de produção [NIL80] não é mera coincidência: O mais interessante é que de algum modo tudo isso se aglutina no comportamento da colônia. Deve haver regras que relacionam a experiência de uma formiga com sua ação subsequente, regras como: quando encontrar comida, recolha-a; quando encontrar perigo, rode em círculos e emita o odor de alarme.

Em resumo a gestão de um formigueiro mais velho é mais "inteligente" que um mais novo. Essa conclusão, do autor, baseia-se especificamente no item 4.7.



As formigas não nascem para executar certa tarefa; a função de cada uma delas muda juntamente com as condições que encontra, incluindo as atividades de outras formigas. Isso não mostra somente aprendizado, mas também adaptabilidade.

O sinal está no padrão do contato. Isso mostra que nem todo sinal igual tem o mesmo significado. Tudo depende da circunstância. É nebuloso.

Até aqui foram transcritos trechos bem importantes da descrição biológica, apresentada por Gordon, do formigueiro. Tais partes mostram o quanto um formigueiro possui de auto-organização, mecanismos nebulosos de atuação, aprendizado; em fim, inteligência. A seguir serão mostrados grifos do texto produzido a partir dos diálogos que Hofstadter apresenta em [HOF00]. Como as anteriores, essas partes também mostram o quão engenhosa é uma colônia de formigas.

A ação das formigas, em resposta à chegada do tamanduá muda completamente a distribuição de castas do formigueiro. Essa redistribuição é uma espécie de mudança de estado, uma atualização. É um acréscimo de uma "porção de conhecimento" ao formigueiro. O que foi exposto por Hofstadter mostra o enorme apelo de inteligência conferido pelo mesmo à colônia de formigas. É interessante notar aqui a figura do Tamanduá, que aparece como um verdadeiro "cirurgião"; corrigindo desordens e proporcionando a organização da colônia a partir de certa desorganização.

Portanto, o sistema inteiro é responsável por como seus símbolos se acionam uns aos outros, e assim é bastante razoável falar do sistema inteiro como o "agente". Tal colocação vem bem de encontro ao que se propõem com o AgeFor, ou seja, apesar de as formigas poderem ser vistas como agentes que cooperam entre si, produzindo com isso a inteligência do formigueiro, pode-se, num nível maior de abstração, considerar a colônia como o agente.

Foram anteriormente ressaltadas algumas características consideradas mais importantes nas descrições biológica e cognitiva de uma colônia de formigas. Tais características são bastante desejáveis para o modelo do agente formigueiro que ora está sendo proposto.

Atualmente, quando se fala em metáfora de colônia de formigas para a construção de programas de computador, a maior referência é Marco Dorigo

[DOR92] e alguns artigos clássicos sobre o tema são [DOG97] e [DMC96]. A partir daí foram postas as bases para os algoritmos baseados no comportamento forrageador de tais bichinhos. Desde então muita coisa vem sendo feita como em [GTD97], [STD99], [STM99]. Detalhes sobre o funcionamento dos algoritmos podem ser vistos no capítulo 2. Fato interessante de ser notado é que tal proposta não tem plausibilidade biológica, o que obviamente não deprecia a abordagem, a exemplo das Redes Neurais Artificiais [HAY94]. Um ponto curioso mostrado em [DOG97] é que essa proposta só pode ser aplicada em problemas que envolvam caminhos, tais como o problema do caixeiro viajante. A partir daí, uma análise de tudo o que vem sendo feito nessa área mostra que toda produção tem o seu foco voltado para problemas de otimização discreta, em especial, aqueles que envolvem caminhos.

Nessa abordagem a proposta é mais ampla. Pensa-se em um modelo de Agente – AgeFor – que, agregue muitas das qualidades e faculdades cognitivas que o Formigueiro possui, como já foi mostrado.

No capítulo 3 falou-se de problemas de distribuição juntamente o problema do empacotamento tridimensional, mostrando suas dificuldades e relevância prática.

Já no início deste foi feita uma abordagem de um problema de otimização discreta que envolve tanto a distribuição quanto o empacotamento. Uma análise rápida de ambos, juntamente com capítulo anterior, mostra o quanto o casamento desses dois problemas, aparentemente dissociados, podem sugerir interessantíssimos e difíceis novos problemas.

No problema dado como exemplo, o que tem que ser observado é o fato de ambas as coisas estarem intimamente relacionadas – o empacotamento e a distribuição – uma vez que, ao ser feita a distribuição é necessário que a carga esteja disposta de modo que a entrega possa levar o mínimo de tempo possível, o que sugere um empacotamento que leve em conta a distribuição. Mais que isso, é desejável que o caminhão leve o máximo de carga possível, o que sugere um empacotamento bem feito.

Apesar dessa junção indissociável, deve-se notar que são dois problemas de difícil solução se forem tratados individualmente, o que leva a conclusão de que a dificuldade tende a aumentar com a inevitável junção de ambos em vista ao melhor desempenho.

No capítulo 3 foi mostrado que as abordagens tradicionais, pautadas em modelos matemáticos rígidos, bem como seus algoritmos de programação matemática não oferecem boas soluções quando as instâncias dos problemas tendem a crescer e as restrições passam a ser complicadas de serem representadas. Obviamente, como alternativa para a solução de problemas dessa natureza, a partir de agora existirá o AgeFor. Não obstante, antes que o mesmo seja apresentado formalmente será discutida uma interessante e viável abordagem para a solução do problema dado como exemplo.

Um problema de distribuição como o exposto trata-se de um de problema de roteamento. O problema do caixeiro viajante também é um problema de roteamento. Em [DOG97] e [DMC96] foi mostrada a solução de um problema de roteamento utilizando-se algoritmos baseados na metáfora da atividade forrageira das formigas. O que, em parte, vem de encontro ao que se irá propor com o AgeFor. Um fato interessante e muito importante é que essa solução oferece resultados muito superiores àqueles apresentados por algoritmos oriundos da programação matemática, bem como algoritmos baseados em heurísticas. Em ambos os artigos são apresentados quadros comparativos que mostram o desempenho de várias formas de solução. Dessa forma, ainda que separada do empacotamento, a distribuição poderia vir a ser efetuada com muito sucesso. O que mostra a viabilidade de um mecanismo alternativo de solução que é a metáfora baseada em formigas.

Do ponto de vista do empacotamento tridimensional, também no capítulo 3 foram mostradas várias de suas características e dificuldades inerentes ao fato de o mesmo também ser de difícil solução quando apresentado com grandes instâncias. Em [COW92], encontra-se uma brilhante trabalho, utilizando Algoritmos Genéticos (maiores detalhes no capítulo 2) para a solução de tal problema. Faz-se importante notar que tal abordagem para solução, não só diferencia-se dos mecanismos tradicionais para tanto, mas também é superior a esses, principalmente no que diz respeito ao aumento das instâncias dos problemas. Com isso, apesar de ser dissociada da distribuição, vê-se a viabilidade de se tratar difíceis problemas de otimização combinatória com algoritmos inspirados na natureza.

Com os comentários feitos anteriormente vê-se que o problema do início do capítulo pode ser perfeitamente tratado com abordagens inspiradas na natureza. O único inconveniente do que foi mostrado reside no fato de que ambos são os resultados de trabalhos independentes, feitos em épocas bem diferentes. No entanto, uma vez que o objetivo desse trabalho não é solucionar o problema exemplo, que foi enunciado somente com fins ilustrativos, pode-se considerar que o mesmo está resolvido, faltando para tanto uma junção entre as necessidades de distribuição e suas implicações com a disposição da carga no interior do veículo e vice-versa.

Junções como as citadas acima podem nem sempre ser triviais e se o são, nem por isso deixam de representar um grande e engenhoso trabalho extra. Tarefa essa que pode ser perfeitamente imaginada analisando-se o problema dado como exemplo e as soluções apresentadas. Para tentar corrigir distorções como essas e solucionar uma gama de problemas por meio de Agentes de Software Inteligentes esse trabalho propõem um modelo que caminha nessa direção.

#### 4.10 AgeFor – Agente Formigueiro

Partindo agora especificamente para a proposta de modelo do qual se ocupa esse trabalho, após todo o embasamento e discussões apresentadas anteriormente, mais uma vez deve ser dito que o objetivo aqui é propor um modelo para a construção do Agente e não o Agente construído, implementado e testado com os respectivos resultados.

O AgeFor – Agente Formigueiro, é uma abstração feita a partir de tudo o que foi mostrado nos capítulos anteriores, em especial no último, sobre o que vem a ser, e como se comporta uma Colônia de Formigas. É uma metáfora que ***não segue a mesma linha das demais metáforas inspiradas na natureza***, em outras palavras, há uma forte presença de fatores biológicos que, em relação aos demais lhe confere um certo nível de plausibilidade biológica; o que é um fator de originalidade.

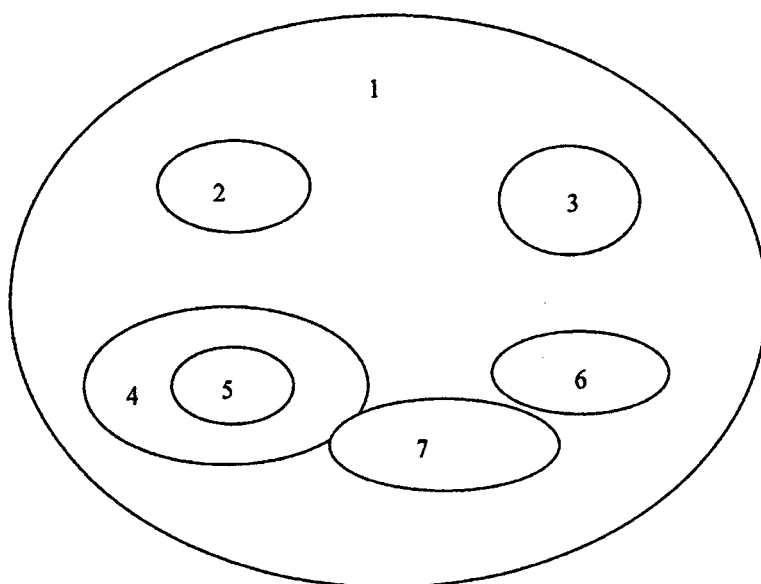
No início deste capítulo foi dito que um Agente nesse trabalho deveria ser capaz de perceber o ambiente no qual estava inserido e, a partir disso agir sobre ele. Deveria ser capaz de comunicar-se com outros agentes, dessa forma caracterizando

um ambiente multiagente. Possuiria uma medida de desempenho para avaliar a sua taxa de sucesso. Teria um mínimo de autonomia. Contaria também com uma porção de conhecimento a respeito do ambiente em que está inserido.

Ainda nesse capítulo, nas descrições biológicas e cognitivas de uma colônia de formigas nota-se facilmente que um formigueiro reúne não só todas essas características, mas muitas outras. A partir daí, então construir-se-á o AgeFor.

Um fato extremamente importante e que confere ao AgeFor um enorme apelo de originalidade é vez que ele encontra-se embasado na metáfora do Formigueiro em sua proposta e não, como vem sendo feito por diversos autores, na metáfora da atividade forrageadora das formigas, como em [DOR92]. Ta característica constitui uma de suas grandes contribuições.

Considere a figura 4.1 abaixo:



*Figura 4.1 - AgeFor*

São sete figuras ovais contendo uma a outra, uma junto da outra. Com esse desenho simples representa-se o AgeFor.

A figura maior (1), que contém as demais, representa o formigueiro. O qual nada mais é que um agrupamento de formigas. As figuras menores e internas ao maior representam os sinais, times, times de nível mais baixo, sugeridos por Hofstadter em [HOF00] que dão sentido cognitivo ao formigueiro, ou seja, mostram a divisão de castas presente na colônia e que conferem inteligência às suas

atividades. A junção de tudo isso, ainda segundo o mesmo autor resulta nos símbolos, que ao serem manipulados juntos formam o Agente ou Formigueiro.

Seguindo a abordagem biológica, vê-se que não há um comando central, um centro de controle. Como já foi visto, é dessa forma que funciona um formigueiro. No entanto, tal ausência não implica na falta de coordenação de tarefas em busca dos objetivos.

Agora será feito um paralelo entre o formigueiro e as características que um Agente Inteligente deve possuir culminando com a junção de tudo em um único agente.

#### **4.10.1 Percepção**

Como já foi dito várias vezes, um Agente deve ser capaz de perceber o ambiente no qual está inserido, através de seu sistema de percepção. Na descrição biológica que foi dada de uma colônia de formigas viu-se que as patrulheiras saiam do formigueiro e começavam a monitorar a região em que o mesmo se encontrava. Tal mecanismo consiste em um sistema de percepção que o agente biológico formigueiro se utiliza para iniciar a procura por alimentos. No caso específico do AgeFor o mesmo é dotado de um sistema de percepção que percebe alterações no ambiente em que se encontra. Por exemplo, falando do problema definido anteriormente, no momento da entrada eletrônica de carga em qualquer filial da transportadora o AgeFor detectaria (sistema de percepção – time patrulheiro) e a partir daí iniciar-se-ia uma nova etapa que consistiria em saber o que fazer com a carga. Tal como ocorre com as formigas patrulheiras ao detectarem a presença de alimentos. O time patrulheiro do AgeFor deverá tomar providências no sentido de dar fim à carga.

### 4.10.2 Comunicação

A partir do momento que é detectada certa necessidade, ou alguma alteração no ambiente, o time patrulheiro comunica-se com outros times com o objetivo de tomar alguma atitude em relação à detecção realizada. Tais mensagens serão os Sinais, que hão de percorrer o formigueiro em busca de agentes “desocupados” e aptos a realizarem o trabalho que for necessário. Por “desocupados” deve-se entender que o atendimento à mensagem está diretamente subordinado ao seu grau de importância, que é uma medida nebulosa [MAI91], em outras palavras, pode ser que a mesma não seja atendida. No exemplo em questão, a mensagem deverá ser enviada no sentido de dar um fim à carga recém chegada. No entanto, pode ser que isso tenha que esperar, talvez por sua falta de importância, de urgência, ou de possibilidades. Tudo, como já foi dito, dependerá do contexto.

Faz-se interessante observar que isso já caracteriza um ambiente multiagente, uma vez que mais de uma entidade se reúne, se comunica, com o objetivo de solucionar o problema.

### 4.10.3 Atuação – Ação

Uma vez que o formigueiro entende que algo deve ser feito a partir do que foi detectado, o próximo passo é agir, ou atuar sobre o ambiente no qual o AgeFor está inserido. Para tanto, os sinais levarão a entrar em ação os times de forrageiros (operários). Tal como ocorre em uma colônia real, quando a comida é encontrada, as forrageadoras saem em sua direção para realizar o seu transporte. São trabalhadoras, que provêem a colônia de alimentos e outros materiais obtidos na região circunvizinha. No caso do AgeFor, times específicos de trabalhadores entram em ação com o objetivo de resolver o problema que se apresenta. Falando do exemplo, uma população de formigas é acionada no sentido de detectar como a carga deverá se enviada, qual distância a ser percorrida e qual a sua disposição no interior do caminhão. Cada time desses, com especialidades distintas deverão

cooperar no sentido de maximizarem os resultados a serem obtidos, ou seja, com maior taxa de sucesso possível.

#### **4.10.4 Desempenho**

Ao ser realizada a percepção e a atuação sobre o ambiente em que se encontra o AgeFor necessitará determinar se o caminho que está sendo seguido é ou não o correto. Mais que isso, se em sendo o correto não pode ser melhorado. Para tanto, entra em ação a medida de desempenho, que tem por objetivo mostrar a taxa de sucesso do AgeFor. Um formigueiro real sempre submete suas ações a tal medida, motivo pelo qual pode-se ver, tanto na descrição biológica, quanto na cognitiva, que o mesmo tem taxa de sucesso em suas ações. Falando especificamente do exemplo em questão, a medida de desempenho deverá analisar se a solução dada foi a melhor, se a carga chegará no tempo certo, com o menor custo, de acordo com o que deseja o cliente. Além disso, se o que foi feito não poderia ter sido melhor. Ainda, se o problema foi resolvido no menor espaço de tempo possível. Note que é feita referência ao problema exemplo, o qual possui elevada complexidade computacional.

#### **4.10.5 Autonomia**

Nas descrições do formigueiro pode ser visto que o mesmo possui autonomia para a tomada de decisões que envolvam suas atividades. O que não significa que as formigas tenham um grande grau de autonomia. Tomando-as de forma individual são extremamente burras e absolutamente não sabem o que fazer. Perambulam de um lado para outro sem um sentido bem definido a priori. No caso do AgeFor não é diferente. Seus times têm um grau de autonomia pequeno, restrito àquilo que fazem especificamente. Por exemplo, o time encarregado de empacotar a carga no caminhão não tem autonomia para definir rotas. No entanto, o Agente como um todo tem autonomia para atuar no ambiente de forma plena. Ai reside mais uma característica de originalidade. Uma vez que não há comando central, tal autonomia



encontra-se dispersa ao longo de todo o Agente. Ou seja, suas partes em **comunicação e cooperação** decidem pelo melhor a ser feito em relação a cada situação. Resumindo, o formigueiro – AgeFor – tem consciência de seu ambiente.

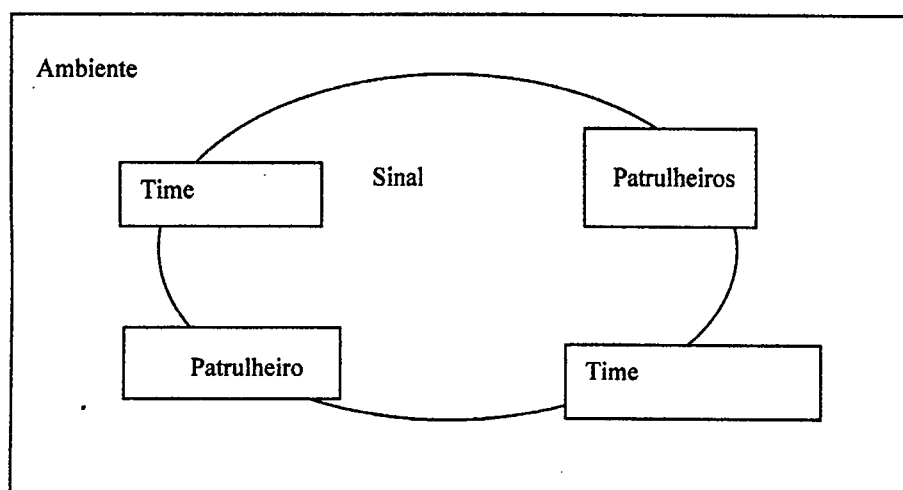
#### **4.10.6 Conhecimento sobre o Ambiente**

Para que o AgeFor possa desempenhar com o maior sucesso possível suas funções, o mesmo conta com uma porção de conhecimento a respeito do ambiente em que encontra-se inserido. Tal conhecimento, ao contrário do que ocorre na maioria dos casos, não se encontra centralizado em um local específico, mas distribuído por todo o Agente. Isso faz com que haja um melhor gerenciamento da informação, uma vez que os diversos times que o compõem acessam diretamente aquilo que lhes interessa. Obviamente, existe um mecanismo que promove a consistência e a integridade de todo o conhecimento, de modo que uma informação, apesar de poder estar em mais que um lugar, ou seja, ser duplicada; não é mentirosa. Observe que isso é um mecanismo que confere mais originalidade ao AgeFor, uma vez que tal gestão de conhecimento, não é prática comum em todo sistema inteligente. É como se cada time patrulheiro, forrageador, possuísse sua própria mini base de conhecimento. A cada uma estará associado conhecimento específico sobre suas atividades. Todavia, como a priori é impossível definir que tipo de conhecimento deve ser utilizado em qual ou tal situação, todas as componentes do Agente têm acesso a toda e qualquer base distribuída em seu interior. Isso está plenamente de acordo com o que acontece com um formigueiro real. As trocas de informações, a partir do conhecimento que o mesmo possui se dá de forma distribuída, uma vez que o conhecimento está disperso. Fazendo um paralelo com o exemplo: Cada time patrulheiro possui sua base de conhecimento particular contendo informações sobre o que fazer em determinada situação, com aquilo que diz respeito à sua atividade específica. Caso o mesmo necessite de informações presentes em outras bases, talvez à relacionada com os forrageadores incumbidos de empacotar a carga no caminhão, a mesmas serão solicitadas ao time competente. Depois de utilizadas, pode ser que sejam atualizadas. Tudo vai depender do uso que foi efetuado, do aprendizado que pode ou não ter sido

realizado. Note também que o fato de o conhecimento se distribuído faz com que o AgeFor seja mais robusto, uma vez que as chances de perda de informação são menores. Essa característica é um grande fator de originalidade e uma das grandes contribuições apresentadas pelo modelo.

Até aqui foi visto como se dá a relação entre o conceito tradicional de agente que está sendo aqui utilizado, e o agente que ora está sendo proposto.

Durante tudo o tempo existirá um constante envio de Sinais entre as componentes do AgeFor, no sentido de fazerem uma avaliação do que está sendo feito verificando-se a necessidade de mudanças ou não no Time ou nos Times que encontram-se trabalhando. Tais mudanças podem ser das mais variadas formas. Pode-se pensar em aumentar ou diminuir a população de formigas responsáveis pela determinação da melhor rota para a carga. Solucionado o problema em questão e ou, promovendo as mudanças necessárias, o Agente Formigueiro, após atualizar suas bases de conhecimento volta a monitoramento do ambiente.



*Figura 4.2 Agente AgeFor*

A figura 4.2 expressa de forma sucinta, simples e mais detalhada, o que vem a ser o Agente AgeFor.

Observe que o mesmo é mostrado como sendo um sinal, formado por patulheiros e times. O que corresponde à divisão de castas proposta em [HOF00] e descrita acima. Graças a essa divisão, o agente possui uma separação de

atividades específicas de cada grupo, qual ocorre com as formigas, e ao mesmo tempo uma certa interseção, ou interpenetração, entre as mesmas gerando um íntimo relacionamento entre as partes, que leva a uma consciência do todo; ou seja, ao Símbolo. Isso não só implementa a cooperação, mas também auxilia na manutenção da memória presente nas bases de conhecimento. O resultado de tudo isso é que surge o Agente, que é quem manipula o Símbolo. Tal como acontece com um formigueiro, ou com cada um de nós, ao manipularmos nossos pensamentos. O que é interessante e importante de ser notado é que nesse nível não se dá importância aos níveis mais baixos do Agente, como a população encarregada de fazer o empacotamento da carga no interior do caminhão, por exemplo. Da mesma forma que, ao produzirmos nossos pensamentos não nos preocupamos com os neurônios que os geraram. Antes pensamos em executá-los.

Essa visão de alto nível que está se propondo para o AgeFor dá uma nova dimensão ao Agente, onde a importância está no que fazer e não em como fazer. Pode parecer estranho, mas é justamente essa visão que lhe confere suas características cognitivas. Com isso reafirma-se mais uma vez uma de suas maiores e mais original característica, que é o fato de ter sido proposto segundo as ações do formigueiro e não das formigas.

Além das explicações já dadas a respeito do Agente como um todo, algumas coisas necessitam ainda ser esclarecidas, dentre elas o mecanismo de representação das diversas bases de conhecimento do Agente. Isso poderá ser feito por meio de regras de produção simples, tais como: *se tem carga para enviar e caminhão disponível então carregue*. Tais regras podem ter um apelo nebuloso do tipo: *se o caminhão A está mais ou menos cheio e ele passará no destino da carga 3 então carregue*. Aqui fala-se em regras de produção para as bases de conhecimento. Note que tal mecanismo não será obrigatório e é mostrado aqui com caráter ilustrativo.

Outro item a ser agregado ao AgeFor será um mecanismo de interface com o usuário, que possibilitará a interação com o Formigueiro. Tal mecanismo pode ser um sistema multimídia para tornar o contato mais amigável. Observe que não se está propondo um sistema em linguagem natural, o que dada às características cognitivas do Agente seria natural sugerir. No entanto, pensa-se que um sistema

multimídia bem amigável poderia, por si só, ser suficiente para implementar a comunicação de forma satisfatória. Até porque, espera-se que o Agente seja o mais autônomo possível, e dessa forma tal comunicação restringir-se-á aquilo que de fato não estiver no escopo do mesmo para resolver.

Falando especificamente dos Times Especialistas pode-se notar que eles têm uma importância fundamental no AgeFor, uma vez que são esses Agentes que incorporam as tarefas específicas de solução de problemas. Como o objetivo é solucionar vários tipos de problemas, mas não todo e qualquer problema, a sua especialidade ficará restrita a implementar algoritmos que imitam a atividade forrageadora das formigas, algoritmos genéticos (ambos vistos no capítulo 2) e um algoritmo híbrido envolvendo colônias de formigas e algoritmos genéticos chamado ASGA [WPO00] que melhora muito a exploração do espaço de busca, tanto do ponto de vista qualitativo quanto quantitativo. Obviamente a escolha de que Time Especialista deverá entrar em cena estará a cargo da situação que será detectada pelos mecanismos de monitoramento do ambiente do AgeFor.

Fato interessante de nota é que esses Times Especialistas ou Forrageadores são por si só Agentes. Como exemplo pode-se analisar os sistemas de formigas. O sucesso das aplicações que as envolvem encontra-se principalmente no fato de que um conjunto formado por formigas reconhecidamente burras produz um comportamento coletivo inteligente. Em outras palavras são vários agentes reativos que juntos promovem a inteligência.

Com isso chega ao final a descrição das propriedades básicas individuais de cada Agente que compõem o AgeFor. Procurou-se mostrar como um conjunto de Agentes até certo ponto independentes e muitas vezes burros, podem concorrer para o sucesso do todo. A partir de agora serão vistas características globais do Agente Formigueiro como um todo.

## **4.11 Processamento Paralelo**

O processamento paralelo está presente nos Agentes que correspondem aos Times Especialistas. Uma vez que esses são baseados em sistemas de formigas e algoritmos genéticos. Apesar de não ter sido abordado especificamente o paralelismo intrínseco, tanto aos algoritmos genéticos quanto aos sistemas de formigas no capítulo 2, por se tratar de tema que fugiria ao escopo do mesmo é fato que tal mecanismo de processamento está naturalmente presente em ambas metáforas. Tal característica pode ser explorada facilmente através da simulação de uma máquina paralela em uma rede de computadores produzindo, dependendo das condições e da instância do problema, um enorme ganho no tempo de processamento. No caso do AgeFor, que se propõem a resolver problemas complexos é algo que não só pode como deve ser amplamente explorado para ambas as metáforas.

Observe que a inclusão de mais essa característica faz o AgeFor mais próximo do formigueiro, aumentando a sua plausibilidade com o mesmo.

## **4.12 Processamento Distribuído**

O modo como foi descrito o funcionamento do AgeFor é um mecanismo eminentemente distribuído, uma vez que todo o monitoramento do ambiente, interação com o usuário e com a base de conhecimento, bem como a solução dos problemas que venham a aparecer são feitos de forma simultânea com total independência uns dos outros, porém com uma forte ligação em vista ao objetivo comum. O trabalho implementado dessa forma, juntamente com o processamento paralelo e as características globais já mencionadas anteriormente do Agente concorre para o sucesso cognitivo do Agente Formigueiro que ora está sendo proposto. Além disso, sendo a memória também distribuída, tal qualidade tende a aumentar bastante.

### 4.13 Comportamento Colaborativo

Além de tudo o que já foi dito a respeito do AgeFor, uma outra característica que não pode deixar de ser mencionada é o comportamento colaborativo. Como já foi visto anteriormente um formigueiro possui uma divisão de castas que geram times e sinais que são os responsáveis pela solução dos problemas que surgem no seu interior. Também com o AgeFor não poderia ser diferente. Todas as suas componentes, patrulheiros, times concorrem para um mesmo objetivo, apesar de sua independência, de forma colaborativa, uns com os outros.

Com isso chega ao fim descrição do AgeFor – Agente Formigueiro Colaborativo, objeto de estudo desse trabalho. Procurou-se deixar claro que, a procura de plausibilidade cognitiva e biológica com uma colônia de formigas real é sua maior característica, o Formigueiro artificial aqui proposto, além de incorporar muitas de suas características apresenta aquela que, na opinião do autor é a principal, que consiste na ***Inteligência Coletiva Colaborativa***. Culminando por ser essa a sua maior contribuição.

## 5 Conclusões

Muitas e ricas são as conclusões que podem ser tiradas desse trabalho. Aqui foram reunidas, em um único Agente, técnicas que usualmente são bem sucedidas em seus domínios de aplicação e por isso nem sempre andam juntas.

Da forma como ficou proposto, o AgeFor trata problemas que são por natureza e definição distribuídos, como é o caso do problema exemplo do capítulo anterior. Procura dar também um tratamento distribuído àquele problema que por ventura não venha a possuir tal característica de forma intrínseca. Além de tudo isso possui internamente mecanismos paralelos que permitem um processamento nessa linha para todo e qualquer problema que se proponha a resolver.

Fato ainda digno de nota é que o AgeFor é recomendado para problemas com uma alta dose de dificuldade e complexidade, como é o caso do problema exemplo. Como já foi visto, o mesmo é por natureza distribuído, paralelo, o que aumenta mais ainda sua dificuldade. Dessa forma, não há sentido em se pensar no AgeFor para resolver problemas bem comportados ou que por ventura possuam algoritmos estáveis e robustos para sua solução. Como um formigueiro real constantemente trata de resolver um grande problema, que é sua sobrevivência e reprodução, e esse problema é particionado em diversos sub-problemas como encontrar comida. Assim também trabalha o AgeFor, uma vez que o mesmo *foi inspirado no comportamento cognitivo e biológico do formigueiro e não das formigas*; consistindo isso, a sua maior contribuição.

Com tudo vê-se que a Inteligência Coletiva, características presentes em um Formigueiro que a princípio é formado por um conjunto de formigas absolutamente burras e que tornam-se inteligente graças à cooperação das mesmas; pode perfeitamente servir de inspiração para o desenvolvimento de programas de computador que se propõem a resolver problemas nem sempre triviais.

Do ponto de vista de trabalhos futuros espera-se que o mesmo possa ser implementado em uma linguagem de programação qualquer para que testes e novas conclusões possam ser obtidas. Nessa linha vale ainda lembrar que desejável seria que isso pudesse ser feito usando-se os mecanismos presentes em uma máquina

paralela virtual para que simulações possam ser feitas sobre uma rede de computadores.

Falando ainda de trabalhos futuros, uma interessante abordagem seria a agregação de outras características funcionais e cognitivas do formigueiro a agentes de software como o que foi aqui proposto, no sentido de tentar conferir-lhe mais plausibilidade biológica. Isso tendo o objetivo de tentar aproxima-lo de um agente que possa ter um propósito mais geral. Um exemplo de tal característica poderia se a auto – organização.



## 6 Referências Bibliográficas

- [ACH97] Achuthan, N.r.; Caccetta, L; Hill, S.P. On the vehicle routing problem. In: *proc. of 2<sup>nd</sup> world congress of nonlinear analysis*. p. 4277-4288. 1997.
- [BAB83] Bodin, L.D; Assad, B.L; Bell, A. Routing and Scheduling of Vehicles and Crew, The State of the Art. *Computers & Ops. Res.* Vol. 10. p. 69-211. 1983.
- [BAS00] Baveja, A.; Srinivasan, A. Approximating low-congestion routing and column-restricted packing problems. *Information Processing Letters*. Vol.74. p. 19-25. 2000
- [BDG92] Beckers, R. Deneubouring, L. J., Goss, S. Trails and U-turns in the selection of the shortest path by the ant *Lasius Niger*. *Journal Theoretical Biology*. Vol. 159, pp.397-415, 1992.
- [BDM94] Boissier, O.; Demazeau, Y. Mavi: A multi-agent system for visual integration. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. Las Vegas, USA. p. 731-738. 1994.
- [BIM90] Bischoff, E.E; Marriot, M.D. A comparative evaluation of heuristics for container loading. *EJOR*. Vol. 44. p.267-276. 1990.
- [BIR95] Bischoff, E.; Ratcliff, M.S. Loading Multiple Pallets. *Journal of the Operational Research Society*. Vol.46, p.1322-1336. 1995.
- [BIS91] Bischoff, E.E. Stability aspects of pallet loading. *OR Spectrum*.vol. 13, p.189-197. 1991.
- [BOR94] Bortfeldt, A . A genetic algorithm for the container loading problem. In *Proceedings of the Conference on Adaptive Computing and Information Processing*. London.vol. 2. p.25-27, 1994.
- [BRE98] Brenner, Walter, et al. *Intelligent Software Agents*. 1ed. Berlin:Springer, 1998.
- [BRE99] Breedam, A.V. Comparing descent heuristics and metaheuristics for the vehicle routing problem. In: *Computers & Operations Research*. Vol.28, p. 289-315, 2001.
- [BRO86] Brooks, J. A; A robust layered control system for a mobile robot. In: *IEEE Journal of Robotics and Automation*, v.1, p. 14-23, 1986
- [BSB81] Barto, A.G. Sutton, R.S. Brower, P.S. Associative search network: A reinforcement learning associative memory. *Biological Cybern.* Vol. 40, p. 201-211, 1981.
- [BTD98] Bonabeau, E. et. al. Fixed Response Threshold and the Regulation of Division of Labor in Insect Societs. *Bulletin of Mathematical Biology*. v. 60, p. 753-807.
- [CAD97] Di Caro, G.; Dorigo, M. AntNet: A Mobile Agents Approach to Adaptive Routing. . In: *Technical Report. Université Libre de Bruxelles, Belgium (IRIDIA)*. 1997.
- [CLI87] Cohen, P.R.; Levesque, H.J. Intention = choice + commitment. In *Proceedings of AAAI-87*. Seattle. p. 410 – 415. 1987.

- [COS97] Costa, Jr. I. **Recuperação de informações em uma base de dados relacional com consulta nebulosa**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Informática e Estatística – UFSC. 1997.
- [COW92] Corcoran, A. L.; Wainwright, R. L. A Genetic Algorithm for Packing in Three Dimensions. **ACM**. 1992.
- [DAG90] Dagli, C.H. Knowledge-based systems for cutting stock problems. **EJOR**. Vol. 44. p. 160-166. 1990.
- [DAR59] Darwin, C. **On the origin of species by means of natural selection**. London, Murray. 1859.
- [DAV91] Davis, L. **Handbook of Genetic Algorithms**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [DEJ75] De Jong, K.A. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems. 1975. Ph.D. dissertation, Univ. of Michigan.
- [DEJ87] De Jong, K. A. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. On Genetic Algorithms and Their Applications. p. 210-216, 1987. Hillsdale, NJ. Proc. **On using genetic algorithms to search program spaces**.
- [DLC89] Durfee, E.H.; Lesser, V.R.; Corkill, D.D. Trends in cooperative distributed problem solving. **IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering**. v.1, n.1, p.63-83. 1989.
- [DMC96] Dorigo, M. Maniezzo, V. Coloni, V. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.** Vol 26, n. 2, p. 29-41, 1996.
- [DOG97] Dorigo, M. Gambardella, L. M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**. Vol 1, n.1, p. 53-66. 1997.
- [DOR92] Dorigo, M. Optimization, learning and natural algorithms. **Ph.D. dissertation**. DEI Politecnico di Milano, Itália, 1992.
- [DOW90] Dowsland, K.A; Efficient automated pallet loading. **EJOR**. Vol. 44, p. 232-238. 1990.
- [DRA99] Drashansky, T. et. al. Networked Agents for Scientific Computing. **Communications of the ACM**. New York. v. 42, n. 3, p. 48-54. 1999.
- [DUR94] Durfee, E.H; Rosenschein, J.S. Distributed problem solving and multi-agent systems: Comparisons and examples. **In Proceedings of the International Workshop on Distributed Artificial Intelligence**. 1994.
- [ESS95] Eshelman, L.J; Schaffer, J.D. Productive recombination and propagating and preserving schemata. In: **Foundations of Genetic Algorithms 3**. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, p. 299-313. 1995
- [FEG91] Ferber, J.; Gasser, L.; Intelligence artificielle distribuée. **Conference on Expert Systems and their Applications**. Tutorial Notes. Avignon, France, 1991.
- [GAJ79] Garey, M.R.; Johnson, D.S. **Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness**. 1979.
- [GAS91] Gasser, L. Social Conceptions of Knowledge and Action: DAI Foundations and Open Systems Semantics. **Artificial Intelligence**. v. 47, p. 107-138. 1991.
- [GAS91] Gasser, L. Social conceptions of knowledge and action: DAI foundations and open systems semantics. **Artificial Intelligence** (Special Volume

- Foundations of Artificial Intelligence). v.47, n.1-3, p.107-138. 1991.
- [GAS92] Gasser, L. Boundaries, Identity and Aggregation: Plurality issues in multiagent systems. In: Werner, E.; Demazeau, Y. **Decentralized Artificial Intelligence**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. p. 199-212.
- [GLO89a] Glover, F. Tabu Search – Part I. **ORSA Journal on Computing**. N.1, v. 3, p. 190-206, 1989a.
- [GLO89b] Glover, F. Tabu Search – Part II. **ORSA Journal on Computing**. N.2, v. 1, p. 4-32, 1989b.
- [GMM90] Gehring, H.; Menschner, K; Meyer, M. A computer-based heuristic for packing pooled shipment containers. **EJOR**. Vol. 4, p. 277-288. 1990.
- [GOL85] Goldberg, D.E. 1<sup>st</sup> Int. Conf on Genetic Algorithms and Their Applications. p 8-15, 1985. Hillsdale, NJ. Proc. **Genetic algorithms and rule learning in dynamic system control**.
- [GOL89] Goldberg, D.E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [GOL94] Göllü, A.; et. al. SmartDb: an object-oriented simulation framework for intelligent vehicles and highway systems. **ISBN 0-8186-6440-1 – IEEE**. 1994.
- [GOR99] Gordon, D. **Formigas em Ação – como se organiza uma sociedade de insetos**. Jorge Zahar, 1999.
- [GOS89] Goss, S. et. al. Self-organized shortcuts in the Argentine ant. **Naturwissenschaften**. Vol 76. p. 579-581. 1989.
- [GTD97] Gambardella, L.M. Taillard, E.D. Dorigo, M. Ant Colonies for the QAP. In: **Technical Report. Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale (IDSIA)**. Vol. 4, 1997.
- [GUS99] Gustavsson, R. Agents with Power. **Communications of the ACM**. New York. v. 42, n. 3, p. 41- 47. 1999.
- [HAT90] Haessler, R.W.; Talbot, R.B. Load planning for shipments of low density products. **EJOR**. Vol. 44, p. 289-299. 1990.
- [HAT99] Hattori, F. et.al.. Socialware: Multiagent Systems for Supporting Network Communities. **Communications of the ACM**. New York. v. 42, n. 3, p. 55-61. 1999.
- [HAY85] Hayes-Roth, B. A blackboard architecture for control. **Artificial Intelligence**. v.26, n.3, p. 251-321. 1985
- [HAY94] Haykin. S. Neural Networks – A comprehensive foundation. **IEEE Press**. 1994
- [HDN91] Hewitt, C.; Inman, J. DAI Betwixt and Between: from “ Intelligent Agents” to Open Systems Science. **IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics**. v. 21, n. 6, p. 1409-1419. 1991.
- [HILL89] Hill, W.C. The mind at ai: Horseless carriage to clock. **The AI Magazine**. p. 29-41, 1989.
- [HOD82] Hodgson, T. A Combined Approach to the Pallet Loading Problem. **IIE Transactions**. Vol 13, n. 3, p. 176-182. 1982.
- [HOF00] Hofstadter, D. Gödel, Escher, Bach – Um Entrelaçamento entre Gênios Brilhantes. 2000.
- [HOL62] Holland, J. H.; Outline for a logical theory of adaptive systems. In: **Journal of ACM**, V.3, p.297-314, 1962.
- [HOL75] Holland, J. H.; Adaptation in Natural and Artificial Systems. **Ann Arbor, MI**:

Univ. Of Michigan Press, 1975.

- [HOL78] Holland, J.H. Gognitive Systems based on adaptive algorithms. In: Waterman, D.A.; Roth-Hayes, F. **Pattern-Directed Inference Systems**. New York: Academic, 1978.
- [HOL86] Hollander, A . The economics of strategic investment inflexible automation. **Discussion Document. University of Montreal**. 1986.
- [HPC93] Hanks, S.; Pollack, M. E.; Cohen, P. R. Benchmarks, Test Beds, Experimentation, and the Design of Agent Architectures. **AI Magazine**. v. 14, n. 4, p. 17- 42. 1993.
- [JAI99] Jain, K.A. et.al. Agents for Process Coherence in Virtual Enterprises. **Communications of the ACM**. New York. v. 42, n. 3, p. 62-69. 1999.
- [JEN93] Jennings, N.R. Commitements and conventions: the foundations fo coordination in multi-agent systems. **The Knowledge Engineering Review**. v. 8, n. 3, p. 223-250. 1993.
- [KAY84] Kay, A. Computer Software. **Scientific American**. v. 251, n. 3, p. 53-59. 1984.
- [KAY84] Kay, A. Computer Software. **Scientific American**. v. 251, n. 3, p. 53-59. 1984.
- [KLM96] Kaelbling, L.P. Littman, L.M. Moore, A.W. Reinforcement learning: A survey. **J Artificial Intelligence Res**. Vol. 4, p. 237-285, 1996.
- [LAN95] Langton, C. G., Artificial Life: An Overview. Cambridge. MIT Press. 1995.
- [LAR91] Laird, J.E. et. al. Robo-SOAR: an integration of external interaction, planning, and learning using SOAR. **Robotics and Automation Systems**. v. 8, n. 1-2, p. 113-129. 1991.
- [LEV90] Levi, P. Architectures of individual and distributed autonomous agents. In: Kanade, T.; Groen, F.C.A.; Hertzberger, L.O. **Intelligent Autonomous Agents 2**. Amsterdam: IAS. 1990, p.315-324.
- [LNR87] Laird, J. E.; Newell, A.; Rosembloom, P.S. SOAR:an architecture for general intelligence. **Artificial Intelligence**, v.33, n.1, p.1-64, 1987.
- [LRN86] Laird, J. E.; Rosenbloom, P.S.; Newell, A. Chunking in SOAR: The anatomy of a general learning mechanism. **Machine Learning**. n.1 p. 11-46, 1986.
- [MAC94] Maculan, N. Campello, R. Algoritmos e Heurísticas – Desenvolvimento e Avaliação de Performance. Eduff. Niterói. 1994.
- [MAE97] Maes, Pattie. Pattie Maes on Software Agents: Humanizing the Global Computer. **IEEE Internet Computing**, Los Alamitos, CA. v.1, n.4, p.10-19, Agosto, 1997.
- [MAH85] Mahoney, J.H. **Intermodal Freight Transportation**. Fundation for Transportation. 1985.
- [MAI91] Maia, L. F. J. **Caracterização e Reconhecimento de Conceitos. Tese de Doutorado**. Unicamp. 1991.
- [MCC79] McCarthy, J. M. **Ascribing Mental Qualities to Machines**. AI Lab, Stanford University. 1979. Tecnical Report, Memo 326.
- [MHW01] Mikler, A. R.; Honavar, V.; Wong, J.S.K. Autonomous agents for coordinated distributed parameterized heuristic routing in large dynamic communication networks. **The journal of Systems and Software**. Vol.56, p. 231-246, 2001.
- [MIC98] Michaelis. Moderno dicionário da língua portuguesa. Melhoramentos. 1998
- [MIC92] Michalewicz, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. Springer-Verlag, 1992.

- [MIF00] Michelewicz, Z. Fogel, D.B. *How to Solve It: Modern Heuristics*. Springer. 2000.
- [MIY97] Miyazawa, F.K. *Algoritmos de Aproximação para Problemas de Empacotamento*. Tese de Doutorado. Instituto de Matemática e Estatística – USP. 1997.
- [MJS98] Min. H.; Jayaraman, V.; Srivastava, R. Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions. In: *EJOR*. Vol. 108. p. 1-15, 1998.
- [MOA94] Morabito, R; Arenales, M. An AND/OR-Graph Approach to the Container Loading Problem. *International Transaction in Operational Research*. Vol.1, n. 1, p. 59-73. 1994.
- [MUL96] Müller, J. P. The Design of Intelligent Agents: A Layered Approach. *Lecture Notes in Computer Science*. V. 1177, Heidelberg, Spring-Verlag, 1996.
- [MUL97] Muller, F. M. Heurísticas e Metaheurísticas. In: *Anais da V Escola Regional de Informática da SBC Regional Sul*. 1997
- [NEW90] Newell, A. *Unified Theories of Cognition*. Cambridge, Massachussets. Harvard University Press. 1990.
- [NIL80] Nilson, N. J., *Principles of Artificial Intelligence*. Tioga Publishing Company, 1980.
- [NOR95] Norvig, S.; Russel, S. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. New Jersey, 1995.
- [NUS97] Nussbaum, M.; et. ali. A fuel distribution knowledge-based decision support system. *Internation Journal of Mgnt. Sci.* vol. 25, n. 2. p. 225-234. 1997.
- [NWA96] Nwana, H. S. Software Agents: An Overview. *Knowledge Engineering Review*. v. 11, n. 3, p. 205-244. 1996.
- [OHJ96] O'Hare, G.M.P.; Jennings, N.R. *Fundation of Distributed Artificial Intelligence*. New York: John Wiley and Sons. 1996.
- [OLI97] Oliveira, E.S. *Problema de Carregamento de Pallets: uma abordagem via Algoritmo Genético*. Tese de Mestrado do Departamento de Informática da Universidade Federal do Espírito Santo. 1997.
- [OLI98] Oliveira, E.S; et. al. *Um Algoritmo Genético para o Problema de Carregamento de Palletes*. Departamento de Informática – UFES. 1998.
- [POL48] Polia, G. *How to Solve It*. Princeton University Press. Princeton, 1948.
- [POL90] Pollack, M.E. Plans as complex mental attitudes. In: Cohen, P.R.; Morgan, J.; Pollack, M.E. *Intentions on Communications*. Cambridge, MA: MIT Press, 1990. p. 77-103.
- [PSP00] Pierr, S.; Said, H.; Probst, W.G. Routing in computer networks using artificial neural networks. *Artificial Intelligence in Engineering*. Vol. 14, p.295-305. 2000.
- [RAG91] Rao, A, S.; Georgeff, M.P. Modeling rational agents within a BDI-Architecture. In: *Technical Report. Australian Artificial Intelligence Institute*. V.14, Carlton, 1991
- [RAG95] Rao, A, S.; Georgeff, M.P. BDI Agents: From Theory to Prattice. In: *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent-Systems(ICMAS)*. San Francisco 1995.
- [SDB92] Sichman, J.S.; Demazeau, Y.; Boissier, O. When can Knowledge-based systems be called agents? In: *XII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, IX Simpósio Brasileiro de Inteligência Artificial*. p. 172-

- 185, 1992.
- [SHO93] Shoham, Y. Agent Oriented Programming. *Artificial Intelligence*. v. 60, n. 1, p. 51-92. 1993.
- [SHO97] Shoham, Y. An Overview of Agent-oriented Programming. In: Bradshaw, J.M. *Software Agents*. Menlo Park, California: AAAI Press, 1997.
- [SMD80] Smith, A; De Cani, P. An algorithm to optimize the layout of boxes in pallets. *Journal of Operational Research*. Vol 31. p 573-578. 1980.
- [STD99] Stützle, T.; Dorigo, M. ACO Algorithms for the traveling salesman problem. In: Miettinen, K; et. al. *Evolutionary algorithms in Engineering and Computer Science: Recent Advances in Genetic Algorithms, Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Programming and Industrial Applications*. John Wiley & Sons. 1999.
- [STM99] Stützle, T. Dorigo, M. ACO Algorithms for the Traveling Salesman Problem. In: *Technical Report. Université Libre de Bruxelles, Belgium (IRIDIA)*. 1999.
- [TAI99] Taillard, E.D. Ant Systems. . In: *Technical Report. Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale(IDSIA)*. Vol.05, 1999.
- [TAM97] Tambe, M. et. al. Intelligent Agents for Interactive Simulation Enviroments. *AI Magazine*. v. 16, n.1, p. 15-39.
- [TAN95] Tanomaru, J. Motivação, fundamentos e aplicações de algoritmos genéticos. In: *II Congresso Brasileiro de Redes Neurais, III Escola de Redes Neurais*. Curitiba, 1995
- [TER91] Terada, R. *Desenvolvimento de algoritmos e estrutura de dados*. McGrawHill, 1991.
- [VIA98] Viana, V. *Meta-heurísticas e programação paralela em otimização combinatória*. UFC Edições. Fortaleza, 1998.
- [VTP99] Vukadinović, K.; Teodorović, D.; Pavković, G. An application of neurofuzzy modeling: The vehicle assignment problem. *EJOR*. vol. 114, p.474-488. 1999.
- [WOJ95] Wooldridge, M.; Jennings, N.R. Intelligent Agents: Theory and Praticce. In: *Knowledge Engineering Review*. V.10, 1995.
- [WPO00] White, P.; Pagurek, B; Oppacher, F. ASGA: Improving the Ant System by Integration with Genetic Algorithms. In: *Technical Report. Carleton University, Canada*. 2000.